

令和4年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業

原子力システム研究開発事業

FFAG 陽子加速器を用いた ADS 用

核データの実験的研究

成果報告書

令和5年3月

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

本報告書は、文部科学省の原子力システム
研究開発事業による委託業務として、国立研
究開発法人 日本原子力研究開発機構が実施
した令和元年度－令和 4 年度「FFAG 陽子加速
器を用いた ADS 用核データの実験的研究」の
成果を取りまとめたものです。

目次

| | |
|--|--------|
| 概略 | xi |
| 1. はじめに | 1-1 |
| 2. 業務計画 | 2.1-1 |
| 2.1 全体計画 | 2.1-1 |
| 3. 業務の実施内容および成果 | 3.1-1 |
| 3.1 中性子生成 DDX と TTN Y の実験的研究 | 3.1-1 |
| 3.1.1 測定およびデータ取得【R1-R4】 | 3.1-1 |
| (1) 中性子検出器に関する検討【R1-R3】 | 3.1-1 |
| (2) ^{237}Np 核分裂計数管に関する検討【R1-R3】 | 3.1-6 |
| (3) 実験条件に関する検討【R1】 | 3.1-14 |
| (4) シャドーパーの検討、設計および製作【R1-R2】 | 3.1-19 |
| (5) 真空チェンバの設計、製作および据え付け【R1-R2】 | 3.1-21 |
| (6) 理論モデルによる DDX および TTN Y の解析【R3】 | 3.1-26 |
| (7) TTN Y 測定実験【R2-R4】 | 3.1-31 |
| (8) DDX 測定実験【R3-R4】 | 3.1-41 |
| (9) データ解析【R2-R4】 | 3.1-46 |
| (10)理論モデルとの比較および課題抽出【R4】 | 3.1-49 |
| (11)中性子多重度の評価【R4】 | 3.1-60 |
| (12)中性子源強度に与える影響評価【R4】 | 3.1-63 |
| (13) ^{237}Np 核分裂計数管を用いた核破砕中性子場測定【R4】 | 3.1-64 |
| (14)短パルス化の技術開発【R1-R4】 | 3.1-66 |
| (15)令和4年度のまとめ | 3.1-67 |
| 3.1.2 陽子ビーム短パルス化技術開発（再委託先：京都大学） | 3.1-68 |
| (1) 短パルス化の検討【R1】 | 3.1-68 |
| (2) 短パルスビーム検出モニタの開発【R2】 | 3.1-70 |
| (3) 短パルス化【R2】 | 3.1-72 |
| (4) パルスビーム調整の高度化【R3】 | 3.1-76 |
| (5) パルス調整機能の改良【R4】 | 3.1-78 |
| 3.2 高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究 | 3.2-1 |
| (1) 検出器システムの検討【R1】 | 3.2-1 |
| (2) データ収集装置の開発【R1】 | 3.2-3 |
| (3) MWPC の製作【R2】 | 3.2-9 |
| (4) MWPC の試験【R2】 | 3.2-11 |
| (5) 核分裂スタートタイミング検出器の製作【R3】 | 3.2-13 |
| (6) 核分裂スタートタイミング検出器の試験【R3】 | 3.2-13 |
| (7) 鉛標的に対する核分裂片質量数分布測定実験【R3】 | 3.2-15 |

| | |
|--------------------------------------|--------|
| (8) ビスマス標的に対する核分裂片質量分布測定実験【R4】 | 3.2-19 |
| (9) 核反応モデルによる核分裂片質量数分布の解析【R4】 | 3.2-22 |
| 3.3 高励起状態の核分裂中性子に関する実験的研究（再委託先：京都大学） | 3.3-1 |
| (1) 核分裂中性子のデータ収集系に関する検討【R1】 | 3.3-1 |
| (2) 核分裂中性子のエネルギースペクトルに関する検討【R2】 | 3.3-2 |
| (3) 中性子検出器架台の設計および製作【R3-R4】 | 3.3-8 |
| (4) 核分裂中性子測定【R4】 | 3.3-10 |
| 3.4 研究推進 | 3.4-1 |
| 3.4.1 研究管理【R1-R4】 | 3.4-1 |
| 3.4.2 研究成果発表【R1-R4】 | 3.4-2 |
| 3.4.3 各研究課題の成果の達成度の評価【R4】 | 3.4-4 |
| 4. 結言 | 4-1 |

表一覧

| | | |
|--------|---|--------|
| 表 3-1 | 使用した ^{237}Np 核分裂計数管の諸量 | 3.1-6 |
| 表 3-2 | 測定で得られた ^{237}Np 核分裂計数管の中性子フルエンスと測定時間および核分裂 計数率 | 3.1-7 |
| 表 3-3 | 3 種類のエネルギーに対する核分裂反応率と核分裂片計数率 | 3.1-8 |
| 表 3-4 | ^{237}Np 核分裂計数管の核分裂計数率解析値と実験値の比較 | 3.1-9 |
| 表 3-5 | ^{237}Np 核分裂計数管を用いた FFAG 実験の計算条件 | 3.1-10 |
| 表 3-6 | 解析対象の核反応モデル | 3.1-27 |
| 表 3-7 | 解析対象の標的 | 3.1-27 |
| 表 3-8 | DDX 測定における各測定点の飛行距離、立体角および測定時間 | 3.1-44 |
| 表 3-9 | 測定結果のフィッティングにより得られた中性子収量 | 3.1-54 |
| 表 3-10 | PHITS の核反応モデル計算により得られた中性子収量の解析値と C/E 値 | 3.1-54 |
| 表 3-11 | DDX 測定値比較対象の核反応モデルおよび評価済み核データライブラリ | 3.1-55 |
| 表 3-12 | DDX 測定で用いた標的のエネルギー損失と入射エネルギーノミナル値 | 3.1-55 |
| 表 3-13 | DDX 蒸発成分のフィッティングパラメータ評価値 | 3.1-60 |
| 表 3-14 | DDX 前平衡成分のフィッティングパラメータ評価値 | 3.1-61 |
| 表 3-15 | 鉛およびビスマスに対する中性子多重度の評価値 | 3.1-62 |
| 表 3-16 | 鉛およびビスマスに対する中性子多重度評価値と核反応モデルによる解析値との 比較 | 3.1-63 |
| 表 3-17 | ^{237}Np 核分裂計数管を用いた核破砕中性子場測定条件 | 3.1-65 |
| 表 3-18 | 核分裂片分布の測定時間見積もりのための計算条件 | 3.2-3 |
| 表 3-19 | 必要となる入力チャンネル数 | 3.2-4 |
| 表 3-20 | 時間分解能 | 3.2-7 |
| 表 3-21 | 662 keV ガンマ線に対するエネルギー分解能 | 3.2-9 |
| 表 3-22 | 核分裂中性子測定の検討における計算条件 | 3.3-5 |
| 表 3-23 | 核分裂中性子測定に用いた実験条件 | 3.3-13 |
| 表 3-24 | 核分裂中性子数 | 3.3-16 |

図一覧

| | | |
|--------|--|--------|
| 図 1-1 | ADS の概念図 | 1-2 |
| 図 1-2 | ADS (分離変換技術) の導入による廃棄物の潜在的放射性毒性の低減 | 1-2 |
| 図 1-3 | FFAG 加速器の外観 | 1-3 |
| 図 2-1 | 本研究開発の年次ごとの計画 | 2.1-2 |
| 図 3-1 | 実験で使用する液体有機シンチレータ EJ-301 と光電子増倍管 | 3.1-1 |
| 図 3-2 | 中性子およびガンマ線検出事象に対する液体有機シンチレータの発光応答の概念 | 3.1-2 |
| 図 3-3 | バイアス試験の測定体系および測定回路 | 3.1-3 |
| 図 3-4 | データ収集システム SIS3316 | 3.1-3 |
| 図 3-5 | ^{241}Am ガンマ線および ^{137}Cs ガンマ線の検出事象に対する EJ-301 の波高分布 | 3.1-4 |
| 図 3-6 | 中性子検出器応答試験の測定回路 | 3.1-4 |
| 図 3-7 | パルス波形弁別の二次元プロット | 3.1-5 |
| 図 3-8 | ^{241}Am バイアスおよび ^{137}Cs バイアスに対する中性子検出効率の SCINFUL に よる解析値と実験値の比較 | 3.1-5 |
| 図 3-9 | ^{237}Np 核分裂計数管の構造 | 3.1-6 |
| 図 3-10 | ^{237}Np 核分裂計数管応答試験の応答試験の測定回路 | 3.1-7 |
| 図 3-11 | ^{237}Np 核分裂計数管応答試験における ^{237}Np 核分裂計数管の配置 | 3.1-7 |
| 図 3-12 | ガスに対する核分裂片のエネルギー付与分布 | 3.1-8 |
| 図 3-13 | ^{237}Np 核分裂反応率測定実験における核分裂計数管の配置 (想定) | 3.1-9 |
| 図 3-14 | FC 設置位置における中性子収量および計数率分布 | 3.1-10 |
| 図 3-15 | 高純度ゲルマニウム半導体検出器による ^{237}Np 核分裂計数管のガンマ線測定の様 子 | 3.1-11 |
| 図 3-16 | 高純度ゲルマニウム半導体検出器で測定した ^{237}Np 核分裂計数管のガンマ線エネ ルギースペクトル | 3.1-11 |
| 図 3-17 | ^{233}Pa 核分裂断面積評価値 | 3.1-12 |
| 図 3-18 | ^{237}Np 核分裂断面積評価値 | 3.1-13 |
| 図 3-19 | ^3He 比例計数管を用いた電磁波ノイズ影響試験の測定体系および測定回路の様 式 | 3.1-13 |
| 図 3-20 | ^3He 比例計数管と周辺装置の外観および測定時の ^3He 比例計数管と ^{252}Cf 中性 子源の配置 | 3.1-14 |
| 図 3-21 | オシロスコープで観測された ^3He 比例計数管による中性子検出事象の波形 | 3.1-14 |
| 図 3-22 | ^{252}Cf 自発核分裂中性子に対する ^3He 比例計数管の ADC 波高分布 | 3.1-15 |
| 図 3-23 | TTNY 実験における各測定角度での中性子スペクトル分布 | 3.1-15 |
| 図 3-24 | 任意の飛行距離に対する計数率の評価結果 | 3.1-16 |
| 図 3-25 | 任意の飛行距離に対する計数とエネルギーの関係 | 3.1-17 |

| | | |
|--------|--|--------|
| 図 3-26 | パイルアップを生じないビーム電流、飛行距離および計数時間の関係 | 3.1-18 |
| 図 3-27 | パルス幅、飛行距離およびエネルギー分解能の関係 | 3.1-19 |
| 図 3-28 | 任意長さの鉄を用いたときの検出される中性子収量の減衰 | 3.1-20 |
| 図 3-29 | シャドーバーと架台の設計図面 | 3.1-20 |
| 図 3-30 | 製作したシャドーバーおよび架台の写真 | 3.1-21 |
| 図 3-31 | 製作した真空チェンバの設計図面 (全体図) | 3.1-22 |
| 図 3-32 | 製作した真空チェンバのうち、標的試料ホルダの設計図面 | 3.1-23 |
| 図 3-33 | 製作した真空チェンバのうち、架台の設計図面 | 3.1-23 |
| 図 3-34 | 製作した真空チェンバの写真 | 3.1-24 |
| 図 3-35 | 真空チェンバの据え付け位置 | 3.1-24 |
| 図 3-36 | 据え付け後の真空チェンバ | 3.1-25 |
| 図 3-37 | TTNY 測定用真空チェンバの外観 | 3.1-25 |
| 図 3-38 | 核破碎反応のプロセス | 3.1-26 |
| 図 3-39 | 鉄標的に対する TTNY エネルギースペクトルおよび TTNY 角度分布解析値 | 3.1-28 |
| 図 3-40 | 鉛標的に対する TTNY エネルギースペクトルおよび TTNY 角度分布解析値 | 3.1-29 |
| 図 3-41 | ビスマス標的に対する TTNY エネルギースペクトルおよび TTNY 角度分布解 析値 | 3.1-29 |
| 図 3-42 | 鉄標的に対する DDX エネルギースペクトルおよび DDX 角度分布解析値 | 3.1-30 |
| 図 3-43 | 鉛標的に対する DDX エネルギースペクトルおよび DDX 角度分布解析値 | 3.1-30 |
| 図 3-44 | ビスマス標的に対する DDX エネルギースペクトルおよび DDX 角度分布解析値 | 3.1-31 |
| 図 3-45 | 実験で使用した FFAG 加速器の外観 | 3.1-32 |
| 図 3-46 | TTNY 測定用鉄標的の設置の様子 | 3.1-32 |
| 図 3-47 | 真空チェンバ内に設置された標的および蛍光体の外観 | 3.1-33 |
| 図 3-48 | プロファイルモニタで測定された陽子ビームプロファイル | 3.1-33 |
| 図 3-49 | TTNY 測定における中性子検出器の配置 | 3.1-34 |
| 図 3-50 | TTNY 測定における真空チェンバおよび標的周辺の構造 | 3.1-34 |
| 図 3-51 | 鉛標的 TTNY 測定における中性子検出器の配置の写真 | 3.1-35 |
| 図 3-52 | 鉄標的に対する測定角 0° の中性子エネルギースペクトルの予備測定結果 | 3.1-36 |
| 図 3-53 | セプタム電磁石から発生する散乱陽子およびバックグラウンド中性子のイメージ | 3.1-36 |
| 図 3-54 | TTNY 測定および DDX 測定で用いた 8 台の中性子検出器 | 3.1-37 |
| 図 3-55 | キッカー電磁石に起因するベースラインの揺らぎ | 3.1-38 |
| 図 3-56 | ベースライン測定で得られたベースラインの波形と遅発成分補正量および全成分 補正量の例 | 3.1-39 |
| 図 3-57 | 8 台の中性子検出器の前に置かれた銅ブロック | 3.1-39 |
| 図 3-58 | TTNY 測定実験の測定回路の模式図 | 3.1-40 |
| 図 3-59 | ステップモータの外観 | 3.1-41 |
| 図 3-60 | DDX 測定における中性子検出器の配置 | 3.1-42 |

| | | |
|--------|---|--------|
| 図 3-61 | DDX 測定における真空チェンバおよび標的が設置されたターゲットホルダの構造 | 3.1-42 |
| 図 3-62 | DDX 測定実験における遮蔽体の配置 | 3.1-43 |
| 図 3-63 | ライトガイド付きプラスチックシンチレータの設計図面 | 3.1-43 |
| 図 3-64 | 8 台の中性子検出器の前に置かれた VETO 検出器 | 3.1-44 |
| 図 3-65 | DDX 測定実験の測定回路の模式図 | 3.1-45 |
| 図 3-66 | 鉄標的に対する測定角 5° の TTNy 測定におけるパルス波形弁別の二次元プロット | 3.1-46 |
| 図 3-67 | 鉛標的の測定角 5° に対する TTNy 測定の TOF スペクトル | 3.1-47 |
| 図 3-68 | 鉛標的に対する TTNy 測定および DDX 測定における各測定位置でのエネルギー分解能 | 3.1-48 |
| 図 3-69 | 鉛標的に対する TTNy 測定および DDX 測定における各測定位置での放出中性子の標的から中性子検出器に到達するまでの中性子の透過率 | 3.1-49 |
| 図 3-70 | 鉄標的に対する TTNy の実験結果と核反応モデルによる解析結果の比較 | 3.1-50 |
| 図 3-71 | 鉛標的に対する TTNy の実験結果と核反応モデルによる解析結果の比較 | 3.1-51 |
| 図 3-72 | ビスマス標的に対する TTNy の実験結果と核反応モデルによる解析結果の比較 | 3.1-51 |
| 図 3-73 | 鉄標的に対する TTNy 測定値および 2 成分マクスウェル分布関数によるフィッティング結果 | 3.1-52 |
| 図 3-74 | 鉛標的に対する TTNy 測定値および 2 成分マクスウェル分布関数によるフィッティング結果 | 3.1-52 |
| 図 3-75 | ビスマス標的に対する TTNy 測定値および 2 成分マクスウェル分布関数によるフィッティング結果 | 3.1-53 |
| 図 3-76 | 中性子収量の角度分布 | 3.1-54 |
| 図 3-77 | 鉛およびビスマス標的に対する DDX の実験結果と核反応モデルによる解析結果の比較 | 3.1-56 |
| 図 3-78 | JQMD の切替時間パラメータの設定による鉛標的に対する中性子エネルギースペクトルの比較 | 3.1-57 |
| 図 3-79 | JQMD の切替時間パラメータの設定による鉄標的に対する 140 MeV 陽子入射 180° 方向中性子生成 DDX の比較 | 3.1-57 |
| 図 3-80 | JQMD 計算による 300 MeV 陽子入射 ^{16}O 標的核反応における放出粒子の軌道 | 3.1-58 |
| 図 3-81 | 鉛標的に対する 10 MeV 以下における DDX の比較 | 3.1-59 |
| 図 3-82 | ビスマス標的に対する 10 MeV 以下における DDX の比較 | 3.1-59 |
| 図 3-83 | 鉛標的に対する DDX 測定値および提案式によるフィッティング結果 | 3.1-60 |
| 図 3-84 | ビスマス標的に対する DDX 測定値および提案式によるフィッティング結果 | 3.1-61 |
| 図 3-85 | 鉛およびビスマス標的に対する中性子多重度の角度分布 | 3.1-62 |
| 図 3-86 | 鉛標的に対する陽子入射中性子多重度の推定値 | 3.1-63 |
| 図 3-87 | 核破碎中性子場測定における ^{237}Np 核分裂計数管の配置 | 3.1-64 |
| 図 3-88 | 測定で得られた ^{237}Np 核分裂計数管の波高スペクトル | 3.1-65 |

| | | |
|---------|--|--------|
| 図 3-89 | 実験条件における中性子フラックスのエネルギースペクトルおよび ^{237}Np 核分裂 計数率の解析値 | 3.1-66 |
| 図 3-90 | FFAG 加速器における陽子ビーム短パルス化の原理 | 3.1-68 |
| 図 3-91 | 加速終了間際の縦方向位相空間粒子分布 | 3.1-69 |
| 図 3-92 | 断熱デバンチとバンチ回転を行った後の縦方向位相空間粒子分布 | 3.1-70 |
| 図 3-93 | 真空チェンバ上流側近傍のビームライン上に設置された短パルスビーム検出モニ タ | 3.1-71 |
| 図 3-94 | 短パルスビーム検出モニタ | 3.1-71 |
| 図 3-95 | 短パルスビーム生成に用いた高周波運転パターン | 3.1-72 |
| 図 3-96 | 主リングバンチモニタで観測した主リング周回ビーム | 3.1-73 |
| 図 3-97 | 主リングバンチモニタで観測した主リング周回ビームのバンチ回転部の拡大図 | 3.1-74 |
| 図 3-98 | 主リングバンチモニタで観測した加速終了時および 1/4 バンチ回転後のバンチ波 形 | 3.1-74 |
| 図 3-99 | 短パルスビーム検出モニタの出力 | 3.1-75 |
| 図 3-100 | 取り出された短パルスビームの時間構造 | 3.1-75 |
| 図 3-101 | ヘッドアンプ交換後の短パルスビームモニタで観測された短パルスビームの時間 構造 | 3.1-76 |
| 図 3-102 | 多粒子追跡シミュレーションによる加速終了直後と断熱デバンチング後の縦方向 粒子分布の解析結果 | 3.1-77 |
| 図 3-103 | 短パルスモードと長パルスモードでの縦方向ビームの時間構造 | 3.1-78 |
| 図 3-104 | 真空チェンバの近傍に設置したプラスチックシンチレーション検出器 | 3.1-79 |
| 図 3-105 | プラスチックシンチレーション検出器の出力信号と主リングバンチモニタの出力 信号 | 3.1-79 |
| 図 3-106 | 核分裂片質量数分布を測定する実験セットアップの概略図 | 3.2-2 |
| 図 3-107 | MCP を用いたスタートタイミング検出器および MWPC の動作原理図 | 3.2-2 |
| 図 3-108 | 陽子入射 $^{\text{nat}}\text{Pb}$ 核分裂断面積および陽子入射 ^{209}Bi 核分裂断面積 | 3.2-4 |
| 図 3-109 | 開発したデータ収集装置の外観 | 3.2-5 |
| 図 3-110 | 時間分解能測定セットアップ | 3.2-5 |
| 図 3-111 | 時間差スペクトル | 3.2-6 |
| 図 3-112 | エネルギー分解能測定セットアップ | 3.2-8 |
| 図 3-113 | パルス波高スペクトル | 3.2-8 |
| 図 3-114 | 製作した MWPC の設計図面 | 3.2-10 |
| 図 3-115 | 製作した MWPC の写真 | 3.2-10 |
| 図 3-116 | 4 台の MWPC の試験のセットアップ | 3.2-11 |
| 図 3-117 | 4 台の MWPC によって記録された核分裂片の位置スペクトル | 3.2-12 |
| 図 3-118 | MWPC のカソード電極に誘起された電荷および 2 台の MWPC 間で得られる 核分裂片の TOF スペクトル | 3.2-12 |
| 図 3-119 | 製作した核分裂片スタートタイミング検出器 | 3.2-13 |

| | | |
|---------|---|--------|
| 図 3-120 | 使用したマイクロチャンネルプレートの設計図面 | 3.2-14 |
| 図 3-121 | タンデム加速器施設におけるチャンネルプレートスタートタイミングの試験セッ トアップ | 3.2-14 |
| 図 3-122 | 2つのスタートタイミング検出器で得られた ^{248}Cm 自発核分裂片の時間差スペク トル | 3.2-15 |
| 図 3-123 | 核分裂片質量数分布測定実験のセットアップ | 3.2-16 |
| 図 3-124 | 実験セットアップをビーム上流方向から見た図と斜め上流から見た図 | 3.2-16 |
| 図 3-125 | ビームビューワーで見た陽子ビームの形状 | 3.2-17 |
| 図 3-126 | $p + ^{208}\text{Pb}$ 反応で観測された 4 台の MWPC の信号 | 3.2-17 |
| 図 3-127 | $p + ^{208}\text{Pb}$ 反応で観測された MWPC2、MWPC3 および MCP3 の信号 | 3.2-18 |
| 図 3-128 | $p + ^{208}\text{Pb}$ 反応における MWPC2 と MWPC3 の時間差スペクトル | 3.2-18 |
| 図 3-129 | $p + ^{208}\text{Pb}$ 反応を用いて測定した ^{209}Bi の核分裂片質量分布 | 3.2-19 |
| 図 3-130 | $p + ^{209}\text{Bi}$ 反応で観測した MWPC2-MWPC3 の同時計数事象 | 3.2-20 |
| 図 3-131 | $p + ^{209}\text{Bi}$ 反応および $p + ^{208}\text{Pb}$ 反応で観測された核分裂片の時間差スペクトル | 3.2-20 |
| 図 3-132 | $p + ^{209}\text{Bi}$ 反応実験で得られた ^{210}Po の核分裂質量分布 | 3.2-21 |
| 図 3-133 | $p + ^{208}\text{Pb}$ 反応実験で得られた ^{209}Bi の核分裂質量分布 | 3.2-21 |
| 図 3-134 | 107 MeV 陽子入射 ^{208}Pb 反応における核分裂片質量数分布の核反応モデルによ る解析値 | 3.2-22 |
| 図 3-135 | 107 MeV 陽子入射 ^{209}Bi 反応における核分裂片質量数分布の核反応モデルによ る解析値 | 3.2-23 |
| 図 3-136 | 107 MeV 陽子入射 ^{208}Pb 反応および 107 MeV 陽子入射 ^{209}Bi 反応における核 分裂片電荷分布の核反応モデルによる解析値 | 3.2-23 |
| 図 3-137 | $p + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{209}\text{Bi}$ 反応における核分裂片質量数分布の理論モデルによる解析 値 (補正值) と実験値との比較 | 3.2-24 |
| 図 3-138 | $p + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Po}$ 反応における核分裂片質量数分布の理論モデルによる解析 値 (補正值) と実験値との比較 | 3.2-24 |
| 図 3-139 | 核分裂中性子測定用中性子検出器の配置 | 3.3-1 |
| 図 3-140 | 核分裂中性子測定における測定回路の模式図 | 3.3-2 |
| 図 3-141 | 鉛標的に対する核分裂中性子および核破砕中性子生成 DDX 解析値 | 3.3-3 |
| 図 3-142 | ビスマス標的に対する 100 MeV 陽子入射核分裂中性子および核破砕中性子生成 DDX 解析値 | 3.3-3 |
| 図 3-143 | 鉛標的に対する核分裂中性子および核破砕中性子生成断面積の角度分布解析値 | 3.3-4 |
| 図 3-144 | ビスマス標的に対する中性子生成断面積の角度分布解析値 | 3.3-4 |
| 図 3-145 | 直円錐および直方推の立体角の公式 | 3.3-5 |
| 図 3-146 | 核分裂中性子測定用中性子検出器の入射中性子エネルギーに対する中性子検出効 率の解析値 | 3.3-6 |
| 図 3-147 | 鉛標的に対する検出角度における 1 ショット当たりの核分裂中性子および核破砕 中性子カウントのエネルギー分布 | 3.3-6 |

| | | |
|---------|--|--------|
| 図 3-148 | ビスマス標的に対する検出角度における 1 ショット当たりの核分裂中性子および核破碎中性子カウントのエネルギー分布 | 3.3-7 |
| 図 3-149 | ビスマスおよび鉛標的に対する検出角度における 1 ショット当たりの核分裂中性子カウントの角度分布 | 3.3-7 |
| 図 3-150 | 中性子検出器架台の設計図面 (平面図) | 3.3-8 |
| 図 3-151 | 中性子検出器架台の設計図面 (立面図) | 3.3-9 |
| 図 3-152 | 中性子検出器の図面 | 3.3-9 |
| 図 3-153 | 製作した中性子検出器架台の写真 (令和 3 年度製作) | 3.3-10 |
| 図 3-154 | 製作した中性子検出器架台の写真 (令和 4 年度製作) | 3.3-10 |
| 図 3-155 | 核分裂中性子の試験測定に用いた実験体系 | 3.3-11 |
| 図 3-156 | 核分裂中性子測定に用いた実験体系 | 3.3-12 |
| 図 3-157 | 核分裂中性子測定に用いた実験体系の様子 | 3.3-12 |
| 図 3-158 | 核分裂中性子測定における MWPC と中性子検出器の出力信号 | 3.3-14 |
| 図 3-159 | 核分裂中性子測定における MWPC による時間差スペクトル | 3.3-14 |
| 図 3-160 | ^{209}Bi の核分裂中性子スペクトル | 3.3-15 |
| 図 3-161 | 研究進捗管理表 (令和 4 年度) | 3.4-1 |
| 図 3-162 | 実験管理表 (令和 4 年度 2 月の実験) | 3.4-2 |
| 図 3-163 | 日本原子力学会賞論文賞受賞の盾 | 3.4-5 |

略語一覧

| | | |
|-------|---|----------------------|
| ADC | : Analog-to-Digital Converter | (アナログデジタルコンバーター) |
| ADS | : Accelerator-Driven System | (加速器駆動核変換システム) |
| CVCF | : Constant Voltage Constant Frequency | (定電圧定周波電源装置) |
| DDX | : Double-Differential cross(X)-section | (二重微分断面積) |
| FFAG | : Fixed Field Alternating Gradient | (固定磁場強収束) |
| FPGA | : Field-Programmable Gate Array | (フィールドプログラマブルゲートアレイ) |
| FRS | : Facility of Radiation Standards | (放射線標準施設) |
| FWHM | : Full Width at Half Maximum | (半値全幅) |
| GEM | : Generalized Evaporation Model | (一般化蒸発モデル) |
| GeV | : Giga-electron Volt | (ギガ電子ボルト) |
| GPR | : Gaussian Process Regression | (ガウス過程回帰) |
| HLW | : High-Level Waste | (高レベル廃棄物) |
| INC | : Intra-Nuclear Cascade | (核内カスケード) |
| INCL | : Liège Intra-Nuclear Cascade | (リエージュ版核内カスケードモデル) |
| JQMD | : JAERI Quantum Molecular Dynamics | (原研版量子分子動力学) |
| keV | : kilo-electron Volt | (キロ電子ボルト) |
| KUCA | : Kyoto University Critical Assembly | (京都大学臨界集合体実験装置) |
| LBE | : Lead Bismuth Eutectic | (鉛ビスマス共晶体) |
| MA | : Minor Actinoid | (マイナーアクチノイド) |
| MCP | : Micro-Channel Plate | (マイクロチャンネルプレート) |
| MeV | : Mega-electron Volt | (メガ電子ボルト) |
| MWPC | : Multi-Wire Proportional Counter | (多芯線式比例計数管) |
| PHITS | : Particle and Heavy Ion Transport code System | (粒子・重イオン輸送コードシステム) |
| PSD | : Pulse Shape Discrimination | (波形弁別) |
| RF | : Radio Frequency | (高周波) |
| TOF | : Time-Of-Flight | (飛行時間) |
| TTNY | : Thick Target Neutron Yield | (厚い標的中性子収量) |

概略

原子力発電所の使用済み燃料は、数万年という長期間にわたって放射性毒性を持つ。我が国は、エネルギー資源の有効利用の観点から、これを再処理してプルトニウムやウランを回収し、燃料として再利用することを基本方針としている。再処理の過程で生成される高レベル放射性廃液は、ガラス固化体として地下数百メートルの安定な岩盤地層中に閉じ込め、隔離する計画であるが、合理的に達成可能な限り高レベル放射性廃棄物の毒性を低減し、地層処分の負担軽減を図っていくことは、社会的に大きな意義を持つ。この打開策の一つとして加速器駆動核変換システム（ADS: Accelerator-Driven System）が注目され、世界各国で研究開発が行われている。

ADSでは、GeV領域陽子と鉛・ビスマス標的との核反応で発生する核破砕中性子を用い、高レベル放射性廃棄物中のMAを核分裂反応させることにより、その有害度を低減させる。ADSの技術的課題に、核破砕中性子収量の予測精度の向上および高エネルギー核分裂で発生する核分裂片の分布の解明が挙げられる。ADSでは、様々なエネルギー領域の核反応が中性子や核反応生成物の発生に関与する。現状では入射エネルギー100 MeV以下における核破砕反応および高エネルギー核分裂データの不足が、ADS核特性予測の信頼性評価を困難にしている。

そこで本研究では、京大FFAG加速器を用いて、このエネルギー領域における原子番号70を超える重核種に対する陽子入射核破砕中性子収量と高エネルギー核分裂に関する核データを測定し、核反応モデルを高度化することにより、ADSの早期実現に資することを目的とした。

これらの目的を達成するため、次の4つの項目を立てて研究を進めた。

1. 中性子生成DDXとTTNYの実験的研究

(a) 測定およびデータ取得

100 MeV領域陽子入射における鉛およびビスマス標的に対する中性子生成DDXおよびTTNYの実験データ取得し、核反応モデルとの比較検討を行う。具体的には、液体有機シンチレーション検出器を用い、標的から発生する中性子のエネルギースペクトルを飛行時間法により測定する。中性子生成DDXに対しては薄い鉛およびビスマスを標的として用い、TTNYに対しては100 MeV陽子の飛程以上の厚さの鉄、鉛、ビスマスおよびLBEを標的とし、発生中性子のエネルギースペクトルの実験データを取得する。得られたデータをもとに、ADSの核設計に用いられる核反応モデルとの比較検討を実施する。

(b) 陽子ビーム短パルス化技術開発

現状100 ns程度の陽子ビームのパルス幅を10 nsに短縮する。短縮化はバンチローテーション法とキッカー法の2段階で行う。周回ビームに印加している高周波電場で縦方向の位相空間内でバンチの位相空間構造を90°回転させることにより、時間的な広がり運動量の広がりに変換させることで、パルスの圧縮を行う。さらに、パルス先頭部と末尾部のカットを2台の取出しキッカー電磁石の励磁タイミングを調整することで行う。すなわち、陽子ビームの短パルス化は高周波加速空洞に印加する高周波電場および取出しキッカー電磁石の励磁の制御を高度化することにより実施する。

2. 高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究

100 MeV 領域陽子入射における重核種の核分裂片の質量数分布の測定を行う。原子力機構タンデム加速器施設では、例えば $^{237}\text{Np}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^{238}\text{Pu}$ 代理反応による ^{238}Pu 核分裂のデータを励起エネルギー 70 MeV まで測定している。現在の解析では、反応後の全励起エネルギーがすべて ^{238}Pu に与えられると仮定している。この仮定の成立性を検証するため、この仮定で得られる質量数分布と核分裂モデルとの比較検討を行う。

3. 高励起状態の核分裂中性子に関する実験的研究

100 MeV 領域陽子入射における重核種の核分裂中性子のスペクトル測定を行い、核反応モデルの比較検討を行う。有機液体シンチレーション検出器を試料近傍に多数設置し、MWPC の信号をスタート信号とし、飛行時間法により即発中性子のエネルギースペクトルを測定する。得られたデータをもとに、核分裂の計算モデルとの比較検討を実施する。

4. 研究推進

研究代表者のもとで各研究項目間における連携を密にして研究を進める。

以下に、各研究項目の成果および今後の展望を示す。

1. 中性子生成 DDX と TTNY の実験的研究

(a) 測定およびデータ取得

FFAG 加速器で加速された 107 MeV 陽子ビームを標的に照射し、複数の検出角に対して DDX および TTNY を測定した。一連の実験により、107 MeV 陽子入射による鉄 ($^{\text{nat}}\text{Fe}$)、鉛 ($^{\text{nat}}\text{Pb}$) およびビスマス (^{209}Bi) 標的に対する TTNY ならびに 100 MeV 領域陽子入射による鉛およびビスマス標的に対する中性子生成 DDX を取得した。さらに、107 MeV 陽子ビームと鉛標的との核反応で形成される核破砕中性子場における ^{237}Np 核分裂計数率のデータを取得した。ADS 設計に用いる核反応モデルおよび評価済み核データライブラリによる解析値との比較検討により、JQMD モデルの高度化に成功するとともに、現状の核反応モデルおよび評価済み核データライブラリの高度化に向けた課題を抽出した。得られた TTNY および DDX 測定データをもとに中性子収量と中性子多重度をそれぞれ評価し、現状における核反応モデルおよび評価済み核データライブラリの予測精度を検証した。検証により、INCL4.6/GEM モデルが中性子収量と中性子多重度の実験値をもっとも良く再現することを示した。得られた中性子収量データをもとに、中性子収量の不確実性が、ADS 研究で重要となる中性子源強度に与える影響を調査し、今後の ADS 研究に向けた課題を提案した。

今後は、本研究で得られた中性子データを用いて、ADS 実機や ADS 炉物理実験における中性子源強度に関連するパラメータの感度解析や中性子収量に起因する不確かさ解析を行うことが重要である。また、核反応モデルの改良も引き続き重要なテーマとなる。このテーマでは、実験値をもっとも良く再現した INCL4.6/GEM の改良が現実的だが、このモデルは準弾性散乱の記述に課題があることが明らかとなった。陽子

ビームが利用可能な加速器施設を有効活用して、核反応モデルの高度化を図っていくことが重要である。

評価済み核データライブラリは、様々な実験結果をもとに物理的な整合性を考慮して評価される。本研究で得られたデータと知見を評価材料に加えることで、ADS 開発において、より信頼性の高い評価済み核データライブラリの開発が期待できる。

(b) 陽子ビーム短パルス化技術開発（再委託先：京大）

原子力機構が行う測定およびデータ取得と連携して、陽子ビームの短パルス化技術開発を実施した。バンチローテーション法とキッカー法の2段階で行うことで10 ns未満の短パルス化に成功した。さらに、長パルスビームと短パルスビームを選択できるようにパルスビーム調整機能の高度化を行った。

今後は、本研究で培った技術や知見を、将来の加速器開発に着実に継承し、発展させていくことが求められる。

2. 高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究

FFAG 加速器の陽子ビームを標的に照射し、107 MeV の陽子入射による鉛 (^{208}Pb) およびビスマス (^{209}Bi) に対する核分裂片の質量数分布のデータを取得した。得られた実験データと最新の核反応モデル（核分裂モデル）による解析値との間に不一致があることが明らかとなり、実験と理論の両面で課題を抽出した。

今後は、実験値と理論モデルによる解析値との不一致を解消する努力が求められる。理論の面では、高励起核種の脱励起を記述する核反応モデルの高度化が鍵となる。実験の面では、測定で得られた核分裂片の飛行時間分布から質量数分布へと導出する手法を確立するとともに、核分裂片の陽子数分布測定も重要である。これらの課題は、核反応モデルを用いた詳細解析とともに核反応生成物の陽子数分布と質量数分布を同時に網羅的に取得することで克服できる可能性がある。逆運動学に基づく断面積測定法が、この課題克服に有望である。

3. 高励起状態の核分裂中性子に関する実験的研究（再委託先：京大）

原子力機構が行う高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究と連携して、FFAG 加速器の陽子ビームをビスマス (^{209}Bi) 標的に照射し、107 MeV 陽子入射による ^{209}Bi に対する核分裂中性子スペクトルのデータを取得した。取得したデータの統計精度に課題はあるものの、核反応モデルによる核分裂中性子スペクトルの解析結果は、実験不確かさの範囲内に収まることを示した。さらに、核反応モデルにおける、核反応が起きてから核分裂が発生するまで放出中性子数に関する課題を抽出した。この課題は、逆運動学に基づく断面積測定法により克服できる可能性がある。

4. 研究推進

研究代表者のもとで月に1回程度の定例ビデオ会議を実施し、これらの対応および各研究項目における研究内容について議論するとともに研究項目間の連携を密にして研究を進めた。各研究項目の達成度を評価し、3年半にわたる研究を計画どおりに実施した。

以上、京大 FFAG 加速器の 107 MeV 陽子ビームを用いて、ADS 標的構成材の中性子生成 DDX

と TTTY 測定、重核種に対する高エネルギー核分裂で発生する核分裂片分布および核分裂中性子数の測定を行い、ADS 開発に資する核反応データを取得した。さらに、取得した実験データと核反応モデル（理論モデル）による解析値との比較検討を行い、JQMD モデルの高度化に成功するとともに、核反応モデルの高度化に向けた課題を抽出した。

本研究成果は、ADS の早期実現に向けた核反応工学における技術的課題の解決と ADS 設計の信頼性向上に大きく貢献する。今後は、他の加速器施設の利用や国外研究機関との連携を視野に入れ、各研究項目で明らかになった課題の克服に向けた取り組みが求められる。

1. はじめに

原子力発電所の使用済み燃料は、数万年という長期間にわたって放射性毒性を持つ。我が国は、エネルギー資源の有効利用の観点から、これを再処理してプルトニウム (Pu) やウラン (U) を回収し、燃料として再利用することを基本方針としている。再処理の過程で生成される高レベル放射性廃液は、ガラス固化体として地下数百メートルの安定な岩盤地層中に閉じ込め、隔離する計画であるが、合理的に達成可能な限り高レベル放射性廃棄物 (HLW: High-Level Waste) の毒性を低減し、地層処分の負担軽減を図っていくことは社会的に大きな意義を持つ。この打開策の一つとして加速器駆動核変換システム (ADS: Accelerator-Driven System) が注目され、世界各国で研究開発が行われている [1-1][1-2][1-3]。

図 1-1 に、日本原子力研究開発機構 (以下、原子力機構という) が提案する ADS の概念を示す。このシステムは、1.5 GeV の大強度陽子加速器と未臨界炉心を組み合わせた複合原子炉システムである。炉心を未臨界 (実効中性子増倍率 $k_{\text{eff}} < 1$) に保ったまま核変換を効率的に行うことができる。炉心には HLW のなかでも放射性毒性が特に強いネプツニウム (Np) やアメリシウム (Am) などのマイナーアクチノイド (MA: Minor Actinoid) をむ核燃料が装荷され、その周囲は液体の鉛ビスマス共晶体 (LBE: Lead-Bismuth Eutectic) 合金で満たされる。LBE は、運転中に核燃料から発生した熱を取り出す冷却材として使用されるとともに、高エネルギー陽子による核反応 (核破砕反応) で発生する核破砕中性子を炉心に供給する標的あるいは核破砕中性子源としての役割を果たす。

ADS は、1 基あたりに原子炉 10 基から生じる MA を潜在的放射性毒性の弱い核種に変換する。図 1-2 に、放射性廃棄物の潜在的放射性毒性の時間的ふるまい [1-4] を示す。使用済み燃料のままでは天然ウランと同程度になるのが 10 万年も必要とされるところが、廃棄物から Pu と U を回収し、さらに潜在的放射性毒性の高い MA を分離して ADS で燃焼させると、その毒性を数百年に短縮することができ、負の遺産の問題解決に大きく貢献できると期待される。

核破砕中性子を用いる ADS の研究開発で重要となるのが、核破砕反応を記述する核反応モデルの高度化である。特に、核反応モデル計算によって得られる核破砕中性子の収量ならびにそのエネルギー分布 (スペクトル) や角度分布は、ADS の核変換効率や陽子ビーム電流などの核的性能を評価するうえで必須の情報である。さらに、陽子入射領域と炉心領域の境界を形成するビーム窓には、高エネルギー陽子の照射を受けて材料内部にヘリウムや水素などのガスが生じる。熱的に厳しい条件に晒されるビーム窓のガス生成と照射損傷量を精度良く予測することは、設計上その性能と健全性を確保するために重要である。この他にも、核破砕標的や構成材料の誘導放射能・放射性核種の生成、中性子遮蔽体の遮蔽性能を精度良く評価する必要がある。その基礎的な過程を記述する核反応モデルが果たす役割はきわめて大きい。

京都大学 (以下、京大という) では、京大臨界集合体実験装置 (KUCA: Kyoto University Critical Assembly) と固定磁場強収束 (FFAG: Fixed Field Alternating Gradient) 加速器 (図 1-3) を結合して、ADS を模擬した未臨界炉心の未臨界度測定 [1-5] や MA の核分裂反応率測定 [1-6] などの炉物理実験研究が展開され、その枠組みで核反応モデルの検証が行われている [1-7]。一方、KUCA で実験可能な未臨界体系よりもさらに深い未臨界を想定する実際の ADS では、中性子エネルギー

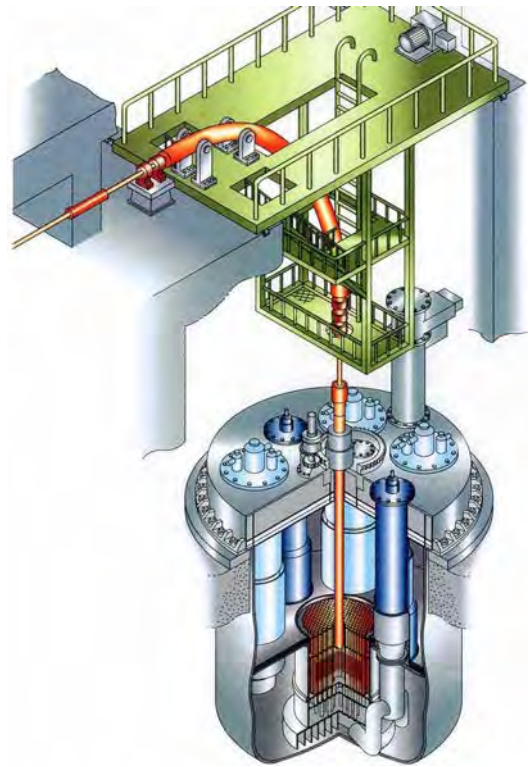


図 1-1 ADS の概念図

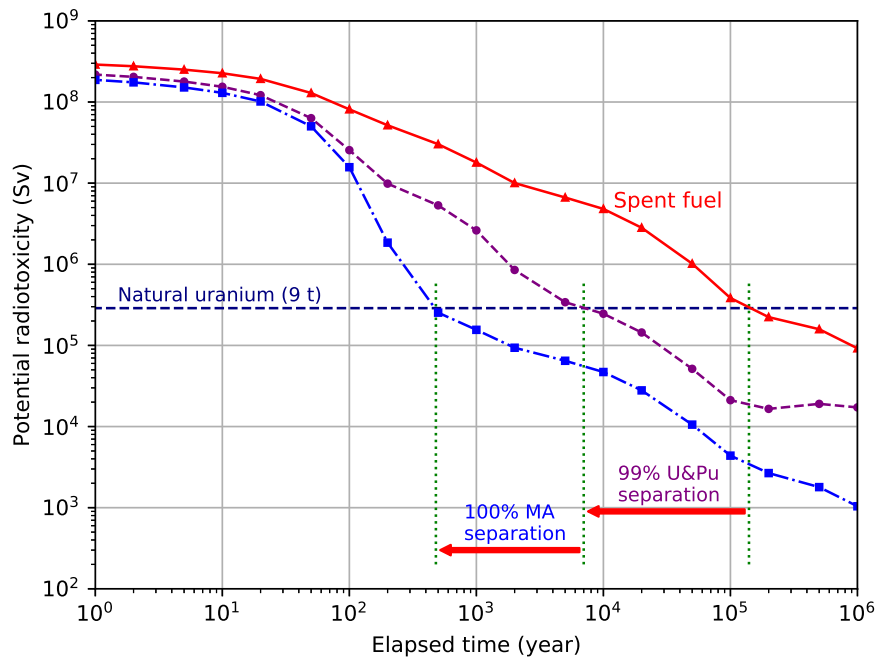


図 1-2 ADS (分離変換技術) の導入による廃棄物の潜在的放射性毒性の低減 (文献 [1-4] をもとに作図)



図 1-3 FFAG 加速器の外観

スペクトルに対する核破砕反応の寄与が増大するため、その核的性能評価や実証実験では、より高精度の核反応モデルによる解析が必要となる。

ADS 核設計における核反応モデルの重要性から、これまでに、高エネルギー陽子入射によって鉛標的から生成される中性子と荷電粒子の二重微分断面積 (DDX: Double-Differential (X)cross section) および厚い鉛標的から放出される中性子収量 (TTNY: Thick-Target Neutron Yield) のエネルギースペクトル測定、ならびに核破砕生成物の核種生成断面積の測定が世界各地の研究機関で精力的に実施され、核反応モデルの高度化と国際原子力機関 (IAEA: International Atomic Energy Agency) によるベンチマーク解析が行われてきた [1-8][1-9][1-10]。しかしながら、これまでの多大な努力にも関わらず、最新の核反応モデルでも特に以下の 2 点において満足のいく精度で予測できるには至っていない。

(1) 数十 MeV から 100 MeV 領域における陽子入射核破砕中性子生成 DDX と TTNY

IAEA は、過去に世界の研究機関で測定された核反応実験データを収集し、核反応実験データベース EXFOR [1-11] として公開している。そのなかで、数十 MeV から 100 MeV 領域における陽子入射鉛標的中性子生成 DDX に関する実験データとして公開されているのは、きわめて少なく、この実験データの不足が核反応モデルの精度検証を困難にしている。近年、先行研究 (佐藤ら (2019)[1-12]) により数十 MeV 領域における最前方角の陽子入射中性子生成 DDX 測定が行われた。ここで得られた測定値と核反応モデルによる解析値との比較の結果、現状の核反応モデルは中性子収量の絶対値とエネルギー分布をともに再現できない。ADS の核特性解析で重要となるのは、数百 keV をピークとする中性子フラックスであるが、これまでに測定された核破砕中性子スペクトルのデータは、測定が比較的容易な数 MeV 以上に限定されている [1-13]。

(2) 高エネルギー核分裂

原子番号が 70 を超える重核種は、核破砕反応により高エネルギー核分裂を引き起こすが、高エネルギー粒子に対するその反応機構は、実験データの不足から明らかにされていない。これまでに、ドイツ重イオン研究所 GSI において ^{208}Pb および ^{238}U の核種生成断面積が測定され [1-14]、核反応モデルの高度化が行われてきた。しかしながら、その対象エネルギー

は主に GeV 領域に限られ、エネルギーが比較的低い数百 MeV 以下に対しては、その実験値が皆無である。一方、原子力機構では、タンデム加速器を用いた代理反応による高エネルギー核分裂現象の解明に向けた実験的な研究が実施されている [1-15]。代理反応による核分裂片の質量数分布の測定結果から、励起エネルギー 35 MeV 程度までは代理反応が適用できることが示されている。しかしながらそれ以上のエネルギー領域では、代理反応の適用性に関するさらなる検証が必要である。

参考文献

- [1-1] 文部科学省 科学技術・学術審議会, 群分離・核変換技術評価について (中間的な論点の取りまとめ), https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2014/01/28/1341663_2.pdf, (参照 : 2023 年 3 月 31 日) .
- [1-2] 文部科学省 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 原子力研究開発・基盤・人材作業部会 群分離・核変換技術評価タスクフォース, 群分離・核変換技術評価について (タスクフォースとりまとめ), https://www.mext.go.jp/content/20211223-mxt_gensi-000019606_1.pdf, (参照 : 2023 年 3 月 31 日) .
- [1-3] 大井川宏之, 加速器駆動核変換技術による廃棄物処分の負担軽減- 核変換専用の核燃料サイクルの技術開発で不透明な将来に備える -, 日本原子力学会誌, Vol.54, No.5 (2012).
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/54/5/54_315/_pdf/-char/ja, (参照 : 2023 年 3 月 31 日) .
- [1-4] 西原健司, 使用済み燃料の潜在的放射性毒性評価のためのデータベース, JAEA-Data/Code 2010-012 (2010).
- [1-5] Iwamoto H, Nishihara K, Yagi T, et al., On-line Subcriticality Measurement Using a Pulsed Spallation Neutron Source, J. Nucl. Sci. and Technol., vol.54, no.4, 2017, pp.432-443.
- [1-6] Pyeon CH, Yamanaka M, Oizumi A, et al., First Nuclear Transmutation of ^{237}Np and ^{241}Am by Accelerator-driven System at Kyoto University Critical Assembly, J. Nucl. Sci. and Technol., vol.56, no.8, 2019, pp.684-689.
- [1-7] Pyeon CH, Yamanaka M., Lee, B. Reaction Rate Analyses of High-energy Neutrons by Injection of 100 MeV Protons onto Lead-bismuth Target, Ann. Nucl. Energy, vol.144, 2020, p.107498.
- [1-8] Meigo S, Takada H, Chiba S. et al., Measurements of Neutron Spectra Produced from A Thick Lead Target Bombarded with 0.5- and 1.5-GeV Protons, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A., vol.431, 1999, pp.521-530.
- [1-9] Leray S., Borne F., Boudard A., et al., Spallation Neutron Production by 0.8, 1.2, and 1.6 GeV Protons on Various Targets, Phys. Rev. C, vol.65, 2002, p.044621.
- [1-10] Filges D., Leray, S., Yariv. Y., et al., Joint ICTP-IAEA Advanced Workshop on Model Codes for Spallation Reactions, Trieste, Italy 4-8 Feb. 2008.
- [1-11] Otsuka N., Dupont E., Semkova V., et al., Towards a More Complete and Accurate Experimental Nuclear Reaction Data Library (EXFOR); International Collaboration between Nuclear Reaction Data Centres (NRDC), Nucl. Data Sheets, 2014, vol. 20, pp.272-276.

- [1-12] Satoh D., Iwamoto Y., Ogawa T., Measurement of Neutron-production Double-differential Cross Sections of ^{nat}C , ^{27}Al , ^{nat}Fe and ^{nat}Pb by 20, 34, 48, 63, and 78 MeV Protons in the Most-forward Direction, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A., vol.920, 2019, pp.22-36.
- [1-13] Iwamoto, H., Meigo, S., Estimation of Uncertainty in Lead Spallation Particle Multiplicity and Its Propagation to a Neutron Energy Spectrum, J. Nucl. Sci. and Technol., vol.57, no.3, 2020, pp.276-290.
- [1-14] Schmidt K.-H., Jurado B., Pleskac P., et al., High-precision Measurement of Total Fission Cross Sections in Spallation Reactions of ^{208}Pb and ^{238}U , Phys. Rev. C, vol.87, 2013, p.034601.
- [1-15] Hirose K., Nishio K., Tanaka S., et al., Role of Multichance Fission in the Description of Fission-fragment Mass Distributions at High Energies, Phys. Rev. Lett., vol.119, 2017, p.222501.

2. 業務計画

2.1 全体計画

前節で述べた背景から本研究では、数十 MeV から 100 MeV 領域の陽子加速が可能な FFAG 加速器に着目し、これを用いて ADS 標的構成材の中性子生成 DDX と TTNy 測定および重核種に対する高エネルギー核分裂で発生する核分裂片分布および核分裂中性子数測定を実施する。得られた実験データと核反応モデル（理論モデル）の比較検討を行うことにより、核反応モデルの精度向上を図ることを目標とする。これにより、ADS の核的性能評価の信頼性を向上させ、ADS の実現性をさらに高めることを狙う。

この目的の達成のため、全体計画を以下の 4 つの項目および 2 つの小項目で進める。

1. 中性子生成 DDX と TTNy の実験的研究

(a) 測定およびデータ取得

数十 MeV から 100 MeV 領域の陽子入射における鉛およびビスマス標的に対する中性子生成 DDX および TTNy の実験データ取得し、核反応モデルとの比較検討を行う。具体的には、液体有機シンチレーション検出器を用い、標的から発生する中性子のエネルギースペクトルを飛行時間法により測定する。中性子生成 DDX に対しては薄い鉄、鉛およびビスマスを標的として用い、TTNy に対しては 100 MeV 陽子の飛程以上の厚さの鉄、鉛、ビスマスおよび LBE を標的とし、発生中性子のエネルギースペクトルの実験データを取得する。得られたデータをもとに、ADS の核設計に用いられる核反応モデルとの比較検討を実施する。

(b) 陽子ビーム短パルス化技術開発

現状 100 ns 程度の陽子ビームのパルス幅を 10 ns に短縮する。短縮化はバンチローテーション法とキッカー法の 2 段階で行う。周回ビームに印加している高周波電場で縦方向の位相空間内でバンチの位相空間構造を 90° 回転させることにより、時間的な広がりを運動量の広がりに変換させることで、パルスの圧縮を行う。さらに、パルス先頭部と末尾部のカットを 2 台の取出しキッカー電磁石の励磁タイミングを調整することで行う。すなわち、陽子ビームの短パルス化は高周波加速空洞に印加する高周波電場および取出しキッカー電磁石の励磁の制御を高度化することにより実施する。

2. 高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究

数十 MeV から 100 MeV 領域の陽子入射における重核種の核分裂片質量数分布の測定を行う。原子力機構タンデム加速器施設では、例えば $^{237}\text{Np}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^{238}\text{Pu}$ 代理反応による ^{238}Pu 核分裂のデータを励起エネルギー 70 MeV まで測定している。現在の解析では、反応後の全励起エネルギーがすべて ^{238}Pu に与えられると仮定している。この仮定の成立性を検証するため、この仮定で得られる質量数分布と核分裂モデルとの比較検討を行う。

3. 高励起状態の核分裂中性子に関する実験的研究

100 MeV 領域陽子入射における重核種の核分裂中性子のスペクトル測定を行い、核反応モデルの比較検討を行う。有機液体シンチレーション検出器を試料近傍に多数設置し、多芯線比例計数管 (MWPC: Multi-Wire Proportional Counter) の信号をスタート信号とし、飛行時間法により即発中性子のエネルギースペクトルを測定する。得られたデータをもとに、核分裂の計算モデルとの比較検討を実施する。

4. 研究推進

研究代表者のもとで各研究項目間における連携を密にして研究を進める。

令和元年度-令和4年度にわたる全体計画を図2-1に示す。

| | 令和元年度 | 令和2年度 | 令和3年度 | 令和4年度 |
|--------------------------|-------------|-------|---------|---------|
| 1. 中性子生成DDXとTTNYの実験的研究 | | | | |
| ① 測定およびデータ取得 | ← 実験準備 | ← 実験 | ← データ解析 | ← |
| ② 陽子ビーム短パルス化技術開発 | ← 短パルス化技術開発 | | | ← |
| 2. 高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究 | ← 実験準備 | ← 実験 | ← データ解析 | ← |
| 3. 高励起状態の核分裂中性子に関する実験的研究 | ← 実験準備 | | ← 実験 | ← データ解析 |
| 4. 研究推進 | ← 研究推進 | | | ← |

図 2-1 本研究開発の年次ごとの計画

3. 業務の実施内容および成果

前節で示した研究項目「中性子生成 DDX と TTNV の実験的研究」、「陽子ビーム短パルス化技術開発」、「高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究」、「高励起状態の核分裂中性子に関する実験的研究」および「研究推進」について業務を実施した。以下に、各研究項目の実施内容および成果を説明する。

3.1 中性子生成 DDX と TTNV の実験的研究

3.1.1 測定およびデータ取得【R1-R4】

令和元年度から令和3年度は、DDX および TTNV 測定のための実験条件の検討、予備解析、実験で使用する検出器の試験、実験機器の設計と製作および予備実験を実施した。TTNV 測定および DDX 測定はそれぞれ令和2年度から令和4年度および令和3年度から令和4年度にかけて実施した。令和4年度に、実験で得られたデータと理論モデルによる解析値との比較および検討を行い、理論モデルの課題抽出を行った。得られた測定データより、中性子収量および中性子多重度を評価し、中性子収量の不確かさが中性子源強度に与える影響を調査した。さらに、 ^{237}Np 核分裂計数管を用いて核破砕中性子場の測定を行った。

以下に、本研究項目の令和4年度までの研究成果についてまとめる。ここでは、既往年度の成果報告書 [3.1-1][3.1-2][3.1-3] の図表を含めた内容も再掲（一部改変）している。

(1) 中性子検出器に関する検討【R1-R3】

使用する中性子検出器

DDX および TTNV の実験で使用する中性子検出器は、浜松ホトニクス社製の光電子増倍管（型番 H3164-12）に、応用光研社製の液体有機シンチレータ EJ-301（NE213 と同等）を光学用グリタにより光学的に接続した液体有機シンチレーション検出器（図 3-1）を採用した。



図 3-1 実験で使用する液体有機シンチレータ EJ-301 と光電子増倍管（接続部およびシンチレータは遮光効果を持つ素材テープで覆う）

バイアス試験

実験で使用する中性子検出器は、放射線によって誘起された液体有機シンチレータのシンチレーション光を光電子増倍管によって電気信号に変換する。電気信号はさらに、アナログ-デジタル変換回路（ADC: Analog-to-Digital Converter）でチャンネル（ch）単位のデジタル情報に変換され、「バイアス」と呼ばれる特定の波高以上の事象（イベント）を中性子の検出事象としてカウントされる。図 3-2 に、中性子とガンマ線検出事象に対する液体有機シンチレータの発光応答の概念を示す。中性子とガンマ線の弁別では、この図で示された発光特性（波形）の違いを利用する。通常の飛行時間（TOF: Time-Of-Flight）法による中性子エネルギーの測定では、 ^{137}Cs 線源のコンプトン端の波高をバイアスとして用いることが多い（以下、これを ^{137}Cs バイアスと呼ぶ）。本測定では低いエネルギー領域の中性子エネルギースペクトルも測定できるように、中性子検出器を通常使用されているサイズよりも小型化し、 ^{241}Am 線源の光電ピークの波高もバイアスとして用いることができるようにした（以下、これを ^{241}Am バイアスと呼ぶ）。中性子検出器を用いて TTNy や DDX および検出効率の測定を行うときは、事前にこれらのバイアスをあらかじめ測定する必要がある。以下ではこれを「バイアス試験」を呼ぶ。

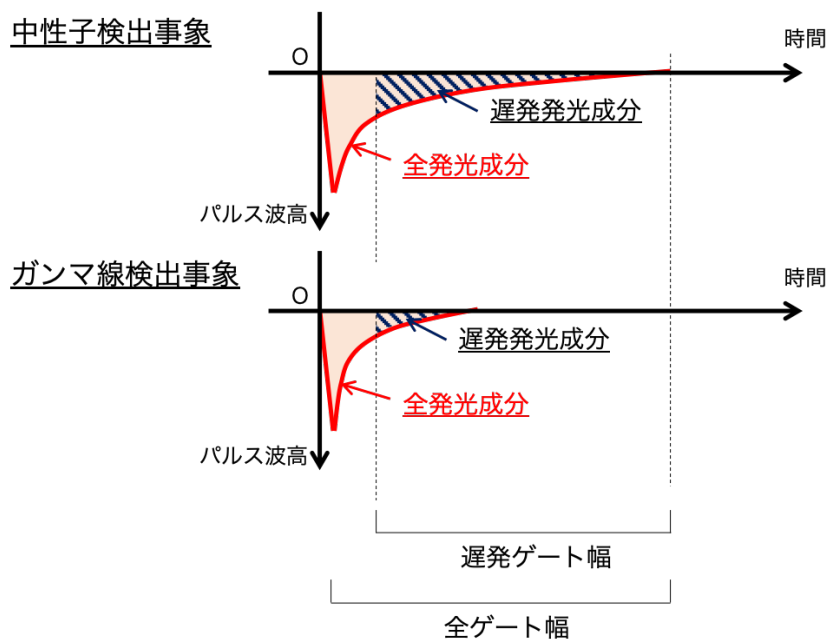


図 3-2 中性子およびガンマ線検出事象に対する液体有機シンチレータの発光応答の概念（中性子の方がガンマ線よりも応答時間が長い）

原子力科学研究所の放射線標準施設（FRS: Facility of Radiation Standards）[3.1-4]において、実験で使用する中性子検出器のバイアス試験を実施した。図 3-3 に、このときの測定体系および測定回路の模式図を示す。この試験のデータ解析では、実際の DDX および TTNy 測定で用いるデータ収集システム（16 チャンネルデジタイザ、ドイツ Struck Innovative Systeme 社製、型番 SIS3316）を用いた（図 3-4）。FRS の照射室に中性子検出器を設置し、中性子検出器を同軸ケーブルを介して制御室に設置した SIS3316 に接続した。60 keV のガンマ線を放出する ^{241}Am 線源および 662 keV のガンマ線を放出する ^{137}Cs 線源を中性子検出器の EJ-301 の直前に置き、-1400

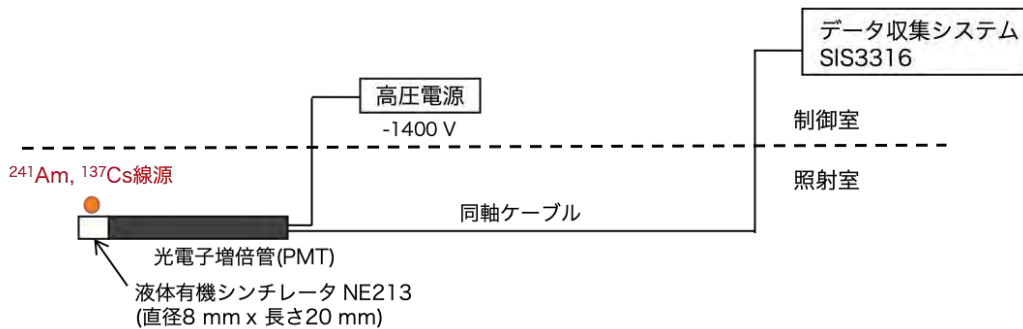


図 3-3 バイアス試験の測定体系および測定回路

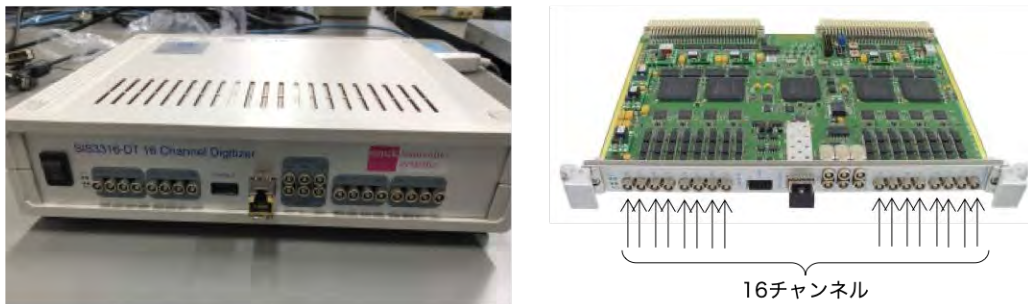


図 3-4 データ収集システム SIS3316 (合計で 16 系統の電子信号を同時に処理することができる)

V の電圧を印加してそれぞれの線源に対して測定を行った。本測定で用いる SIS3316 は、内部にフィールドプログラマブルゲートアレイ (FPGA: Field-Programmable Gate Array) 内蔵のデジタルタイザが組み込まれており、これと高エネルギー物理学実験で広く用いられるオブジェクト指向型データ解析ソフト ROOT [3.1-5] を組み合わせることで、検出器に検出された放射線情報のオンライン解析が可能となる。図 3-5 に、 ^{241}Am 60 keV ガンマ線および ^{137}Cs 662 keV ガンマ線に対して EJ-301 で発光したシンチレーション光の波高分布の測定結果を示す。ここで、図の縦軸はガンマ線の検出事象の数、横軸は ADC によってデジタル値に変換された波高 (単位: チャンネル) を表す。これにより、 ^{241}Am の光電ピークおよび ^{137}Cs のコンプトン端が明瞭に現れることを確認した。

準単色中性子源を用いた中性子検出器の応答試験

実験で使用する中性子検出器の性能を確認するため、原子力科学研究所の FRS において 2 種類の準単色中性子源を用いて中性子検出器の応答試験を実施した。令和 2 年度に実施した応答試験では、重陽子 (d) ビームとトリチウム (T) で発生する $T(d, n)$ 核反応から放出される 14.8 MeV の準単色パルス中性子源 (d -T 中性子源) を用い、令和 3 年度に実施した応答試験では、重陽子 (d) ビームと重水素 (D) 標的で発生する $D(d, n)$ 反応から放出される 5 MeV の準単色パルス中性子源 (d -D 中性子源) を用いた。

応答試験では、繰り返し 4 MHz (周期 250 ns) のパルスビームをタイミング信号として、中性子源位置から中性子が中性子検出器に到達するまでの飛行時間すなわち TOF を測定し、中性子検

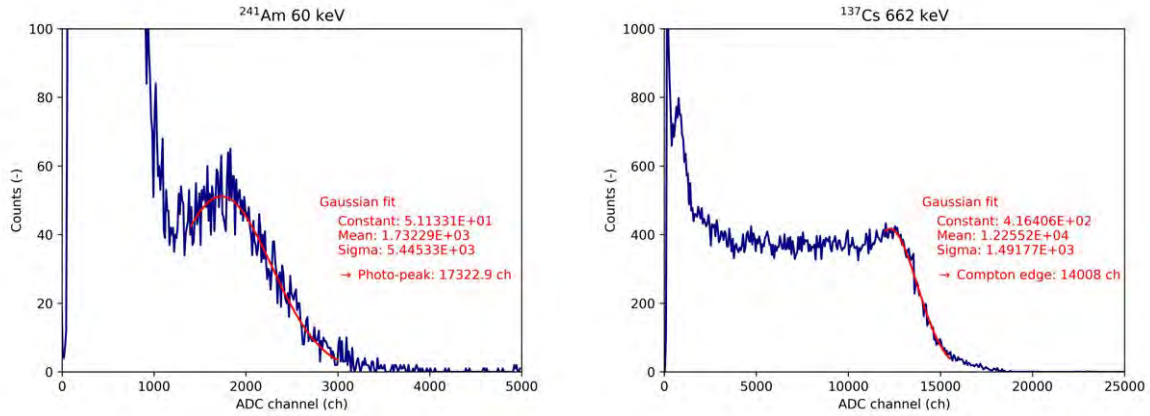


図 3-5 ^{241}Am ガンマ線および ^{137}Cs ガンマ線の検出事象に対する EJ-301 の波高分布（赤線：ガウス関数フィッティングにより得られた波高分布）

出器に検出された中性子と入射中性子数から中性子検出器の検出効率を求めた。このときの測定回路の模式図を図 3-6 に示す。

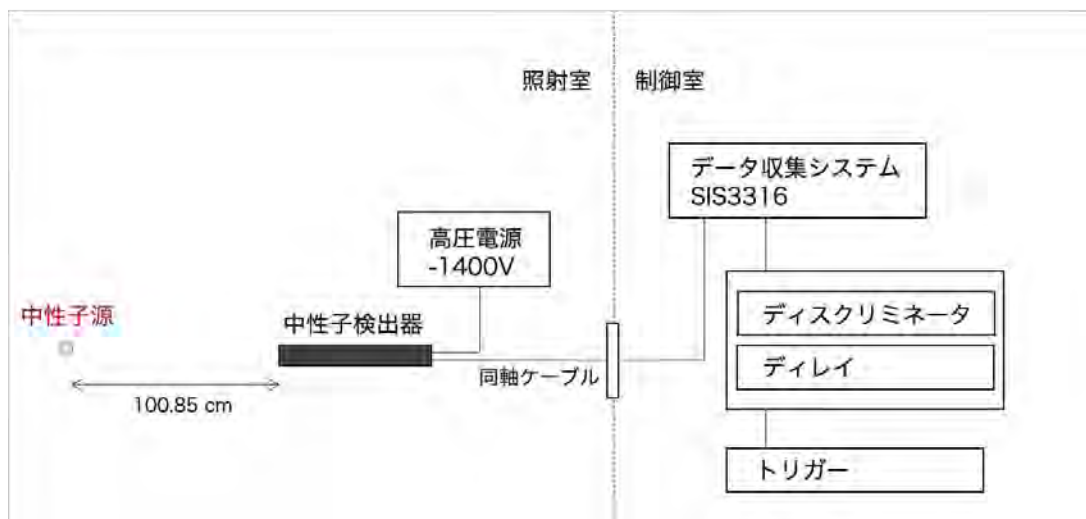


図 3-6 中性子検出器応答試験の測定回路

5 MeV 中性子を用いた測定で得られたパルス波形弁別（PSD: Pulse Shape Discrimination）分布の二次元プロットを図 3-7 に示す。ここで、横軸はパルス波形の立ち上がり成分と遅発発光成分を合わせた全発光成分を表し、縦軸はパルス波形の全発光成分に対する遅発発光成分の比を表す。図中の下に現れている帯はガンマ線検出事象を表し、上に現れている帯は中性子検出事象を表す。PSD プロットをもとにガンマ線成分を除去し、さらに ^{241}Am バイアスおよび ^{137}Cs バイアス以下の成分を除去して、中性子検出事象を計数し、 ^{241}Am バイアスおよび ^{137}Cs バイアスに対する中性子検出効率を求めた。得られた実験値と解析値との比較を図 3-8 に示す。ここで、中性子検出効率の計算には、モンテカルロ粒子輸送計算コード PHITS [3.1-6] (Particle and Heavy Ion Transport code System) に組み込まれている中性子検出効率計算モード (SCINFUL モード [3.1-7][3.1-8][3.1-9]) を使用した。この比較により、SCINFUL は、 ^{137}Cs バイアスでは 5 MeV 中性子に対して 10% および 14.8 MeV 中性子に対して 3% の差、 ^{241}Am バイアスでは 5 MeV 中性

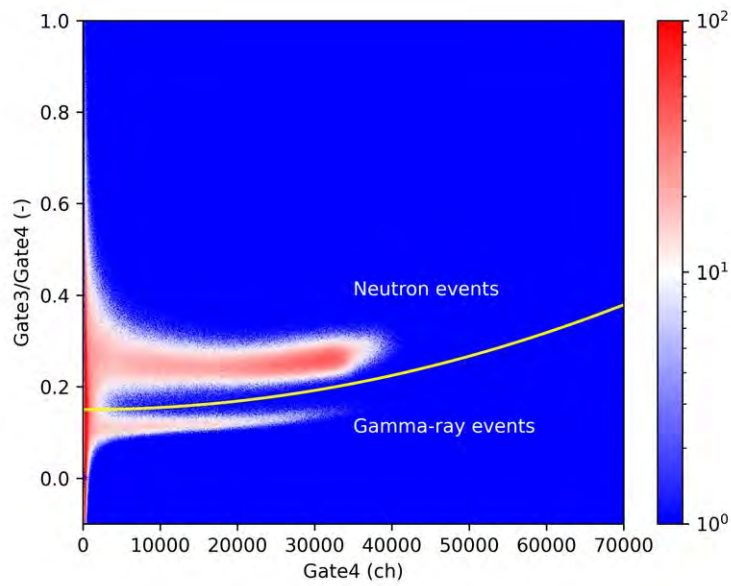


図 3-7 パルス波形弁別の二次元プロット（Gate4 は全発光成分を表し、Gate3 は遅発発光成分を表す）

子に対して 6% の差で再現した。これにより、SCINFUL による中性子検出効率の解析値には、上記の差（数% から 10%）程度の不確かさを考慮する必要があることがわかった。

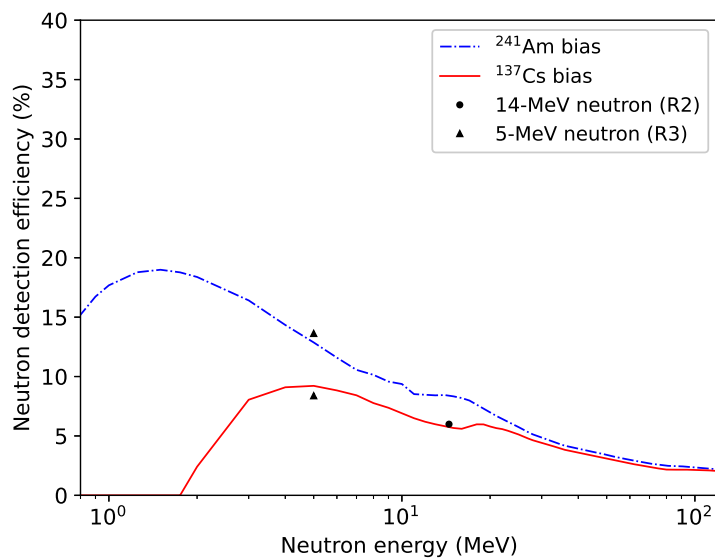


図 3-8 ^{241}Am バイアスおよび ^{137}Cs バイアスに対する中性子検出効率の SCINFUL による解析値と実験値の比較（R2 は令和 2 年度に実施、R3 は令和 3 年度に実施した実験の結果）

(2) ^{237}Np 核分裂計数管に関する検討【R1-R3】

実験で使用する ^{237}Np 核分裂計数管（以下 FC と呼ぶ）は、原子力機構が所有する米国 20th Century Electronics Limited 社製のものを採用した。これは、直径 6 mm、長さ 24.5 mm に有感領域を持つ円筒形状の核分裂計数管であり、 ^{237}Np の放射能の検定登録量は 31.3 kBq（検定年月日 1982 年 6 月 30 日）、測定で使用する印加電圧の値は+400 V である。本製品のカタログに FC の詳細な構造の記載は残されていないが、カタログの図面から図 3-9 のような構造と推定される。表 3-1 に、 ^{237}Np の物理量と放射能をもとに評価した FC の諸量を示す。

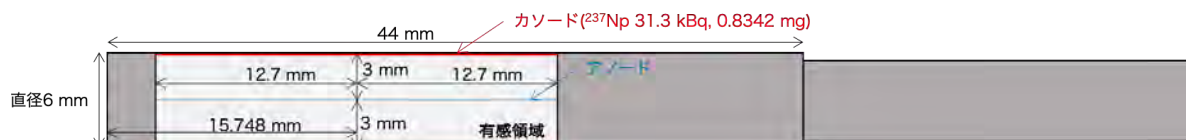


図 3-9 ^{237}Np 核分裂計数管の構造（推定）

表 3-1 使用した ^{237}Np 核分裂計数管の諸量

| 諸量 | 単位 | 値 |
|-------------------------------|----------------------|-------------------------|
| 半減期 | [y] | 2.144×10^6 |
| 崩壊定数 | [1/s] | 1.478×10^{-14} |
| 1 g 当たり ^{237}Np 原子量 | [1/g] | 2.541×10^{21} |
| 比放射能 | [Bq/g] | 2.595×10^7 |
| ^{237}Np 塗布量 | [g] | 1.206×10^{-3} |
| ^{237}Np 個数 | [-] | 3.064×10^{18} |
| ^{237}Np 密度 | [g/cm ³] | 19.86 |
| ^{237}Np 体積 | [cm ³] | 6.072×10^{-5} |
| 塗布面の厚さ（推定） | [cm] | 1.268×10^{-5} |

準単色中性子源を用いた ^{237}Np 核分裂計数管の応答試験

実験で使用する FC の性能確認を目的に、原子力科学研究所の FRS において 3 種類の準単色中性子源（0.565 MeV、5 MeV および 14.8 MeV）を用いて FC の応答試験を実施した（0.565 MeV 中性子を用いた試験は令和元年度、14.8 MeV は令和 2 年度、5 MeV は令和 3 年度に実施した）。このときの測定回路の模式図を図 3-10 に示し、例として令和 3 年度に実施した 5 MeV 中性子を用いた実験における FC の配置を図 3-11 に示す。

表 3-2 に、照射した中性子フルエンス率と照射中の測定時間および測定で得られた FC の核分裂計数計数率を示す。ここで、測定位置における中性子フルエンスは、FRS に整備された校正済みの中性子フルエンスモニタを用いて測定した。計数率の評価ではポアソン分布に従うとして、計数の平方根を計数の 1 標準偏差（ 1σ ）の不確かさと仮定した。14.8 MeV 中性子を用いた試験では、寄生中性子（入射陽子ビームとトリチウム標的に蓄積された重陽子あるいは不純物として存

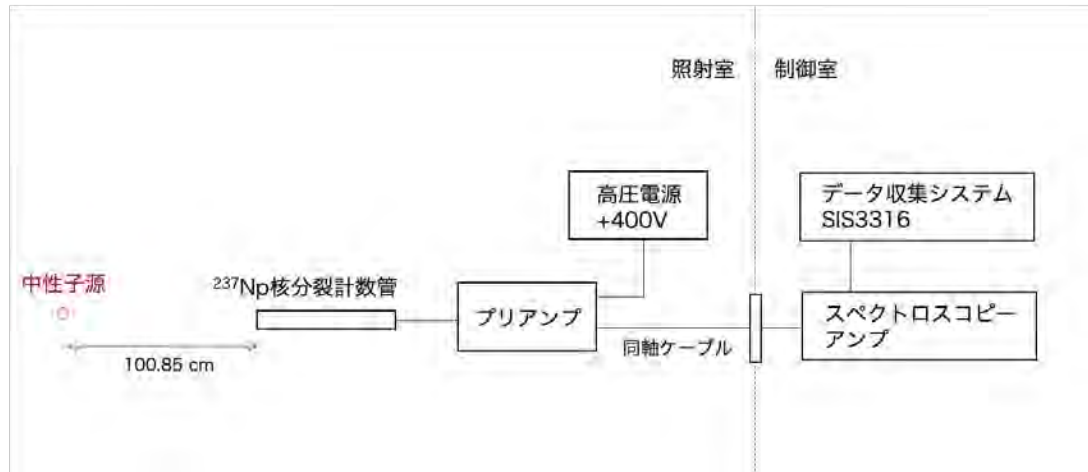


図 3-10 ^{237}Np 核分裂計数管応答試験の測定回路

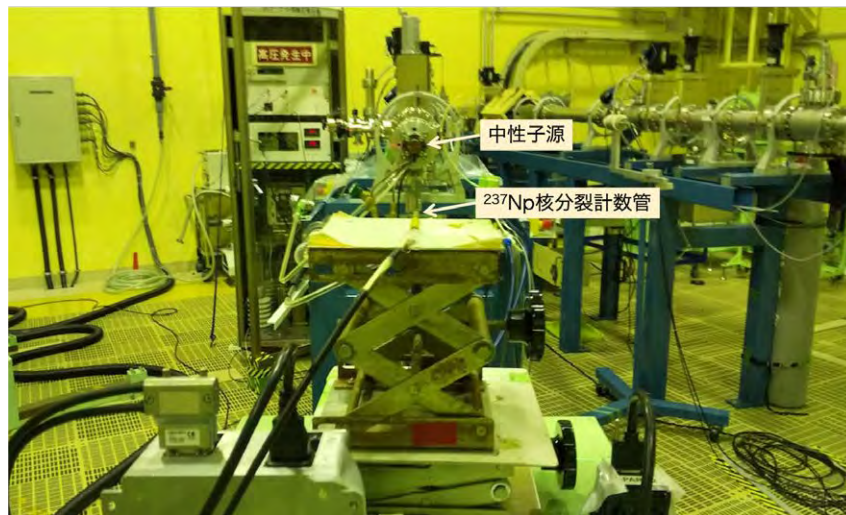


図 3-11 ^{237}Np 核分裂計数管応答試験における ^{237}Np 核分裂計数管の配置 (5 MeV 中性子)

在すると思われる重陽子との核反応 ($d(d, n)^3\text{He}$ 反応) によるバックグラウンド中性子) が見られた。表では、寄生中性子による影響を補正した後の結果を示している。

表 3-2 測定で得られた ^{237}Np 核分裂計数管の中性子フルエンスと測定時間および核分裂計数率

| | 単位 | 0.565 MeV 中性子 | 5 MeV 中性子 | 14.8 MeV 中性子 |
|-----------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| 核反応 | | $^7\text{Li}(p, n)$ | $\text{D}(d, n)$ | $\text{T}(d, n)$ |
| 中性子フルエンス | [1/cm ²] | 1.480×10^7 | 6.200×10^7 | 1.440×10^6 |
| 中性子フルエンス率 | [1/cm ²] | 3.371×10^3 | 2.986×10^3 | 2.954×10^2 |
| 測定時間 | [s] | 4390 | 20761 | 4825 |
| 計数 | [counts] | 15 | 115 | 7.7 [†] |
| 計数率 | [mcps] | 3.4 ± 0.9 | 5.9 ± 0.6 | 1.6 ± 0.6 [†] |

[†] 寄生中性子による影響を補正後の値

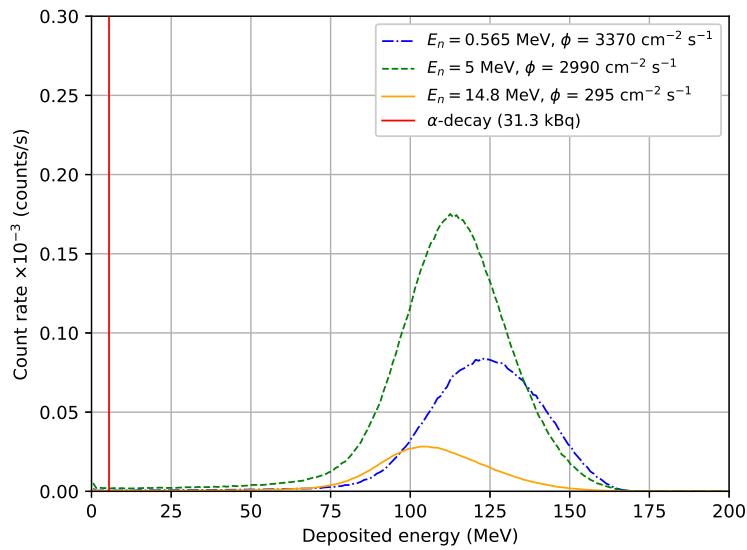


図 3-12 ガスに対する核分裂片のエネルギー付与分布

モンテカルロ粒子輸送計算コードによる解析

図 3-9 の図面をもとに PHITS [3.1-6] の輸送解析用に FC をモデル化し、FRS で実施した実験における 3 種類のエネルギーの中性子に対して、 ^{237}Np 核分裂片のエネルギー分布および核分裂反応率を求めた。FC のカタログには封入ガスの組成の気圧に関する記載がないが、ここでは比例計数管として一般的に使用されている PR ガス (メタン 10% + アルゴン 90%)、100 気圧 (10.1325 MPa) を仮定した¹。

図 3-12 に、ガスに対する核分裂片のエネルギー付与分布を示す。この図では、 ^{237}Np のアルファ崩壊 (31.3 kBq) に伴うアルファ粒子 (平均エネルギー $\bar{E}_\alpha = 4689.7$ MeV) の付与エネルギーを赤色の実線で示している。3 種類のエネルギーに対する核分裂反応率と核分裂片計数率を表 3-3 にまとめる。測定では、あるカットオフ (cutoff) エネルギー以上の事象のみを計数するため、ここではアルファ粒子による付与エネルギーよりも大きくなる 6 MeV をカットオフエネルギーとして核分裂片の計数率 (B) を求め、検出効率 (B/A) を導出した。検出効率はエネルギーにほとんど依存せず、およそ 99% となった。これは、円筒面の電極に塗布された ^{237}Np の核分裂で発生する 2 つの核分裂片は、発生点から互いに正反対の方向に飛び出すため、二つのうち一つは検出器内のガスに、そのうち一つは検出器外に飛び出すことを示唆している。

表 3-3 3 種類のエネルギーに対する核分裂反応率と核分裂片計数率

| | 単位 | 0.565 MeV 中性子 | 5 MeV 中性子 | 14.8 MeV 中性子 |
|-------------|--------|---------------|-----------|--------------|
| 核分裂反応率 (A) | [mcps] | 3.76 | 7.80 | 1.23 |
| 核分裂片計数率 (B) | [mcps] | 3.72 | 7.72 | 1.21 |
| 検出効率 (B/A) | [-] | 99.2% | 98.9% | 98.8% |

¹ 想定される範囲内 (0.1 ~ 200 気圧) でガス圧を変化させても、計算結果に影響がないことを確認した。すなわち、本検討における 100 気圧の仮定による計算結果は妥当と考えられる。

核分裂片計数率の解析値の結果を表3-4にまとめる。ここで、測定値の誤差は 1σ の統計的な不確かさを表す。この表より、0.565 MeV 中性子のときに解析値と実験値との一致がよい。5 MeV 中性子のときにやや過大評価、14.8 MeV 中性子のときにやや過小評価が見られるが、実験値と解析値の差は 1σ の統計的な不確かさと同等あるいはその範囲内であり、PHITS および評価済み核データライブラリ JENDL-4.0 [3.1-10] を用いた解析結果はおおむね妥当であることがわかった。

表 3-4 ^{237}Np 核分裂計数管の核分裂計数率解析値と実験値の比較

| | 単位 | 0.565 MeV 中性子 | 5 MeV 中性子 | 14.8 MeV 中性子 |
|----------------|--------|---------------|---------------|-----------------|
| 核分裂片計数率解析値 (C) | [mcps] | 3.72 | 7.21 | 1.21 |
| 核分裂片計数率実験値 (E) | [mcps] | 3.4 ± 0.9 | 5.9 ± 0.6 | 1.6 ± 0.6 |
| C/E | [-] | 1.1 ± 0.3 | 1.2 ± 0.1 | 0.76 ± 0.27 |

FFAG 実験条件における計数率の推定

評価済み核データライブラリの核分裂断面評価値と中性子収量およびFCの検出効率から、FCの計数率すなわち ^{237}Np の核分裂反応率を評価した。図3-13に示すように、FCは標的が納められた TTNY 測定用真空チェンバのビーム入射軸から 120° 方向に位置する特殊ガラス（低膨張ホウケイ酸ガラス）製で厚さ4 mmのビューポート付近（標的から23 cm離れた位置）に設置することを想定した。評価済み核データライブラリには、20 MeV 以下に対して JENDL-4.0 [3.1-10] の評価値を用い、20 MeV 以上に対して TENDL-2019 [3.1-11] の評価値を使用した（20 MeV 以下で、JENDL-4.0 と TENDL-2019 との間に差異は見られなかった）。中性子収量は、FFAG 実験条件である 107 MeV の陽子ビームを厚さ 30 mm のビスマス標的に照射したときに入射軸から 60° 方向に放出される中性子収量の PHITS による解析結果を用いた。計算条件を表3-5にまとめる。

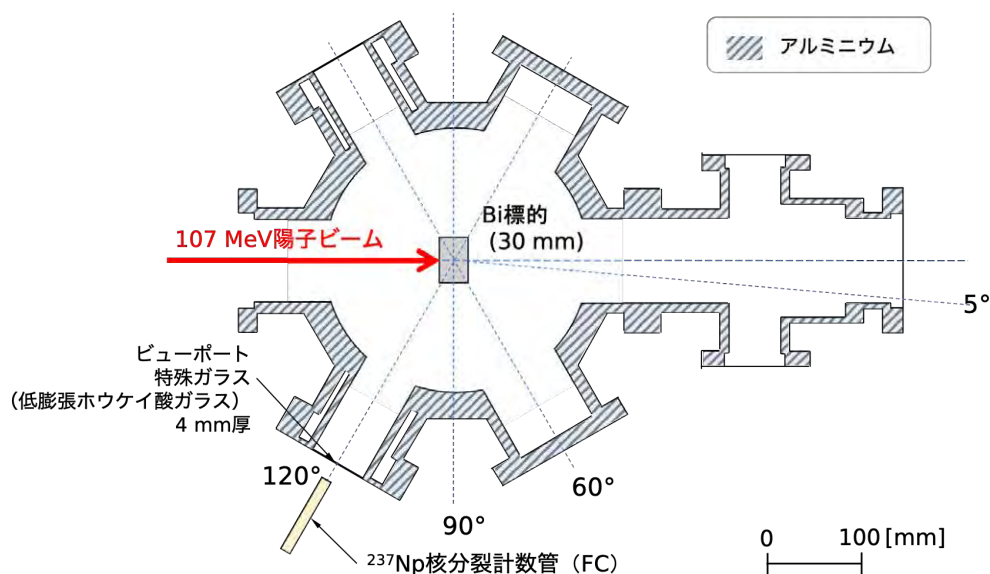


図 3-13 ^{237}Np 核分裂反応率測定実験における核分裂計数管の配置（想定）

表 3-5 ^{237}Np 核分裂計数管を用いた FFAG 実験の計算条件

| 項目 | 単位 | 値 |
|-------------------|------|-------|
| ビーム電流 | [pA] | 100 |
| ビスマス標的から FC までの距離 | [cm] | 23 |
| 検出効率 | [-] | 99.8% |
| 検出角 | [°] | 120 |

図 3-14 に、上記計算条件における FC 設置位置の中性子収量および計数率の入射エネルギー分布を示す。このときの計数率は 1.5 cpm (= 25.4 mcps) となった。

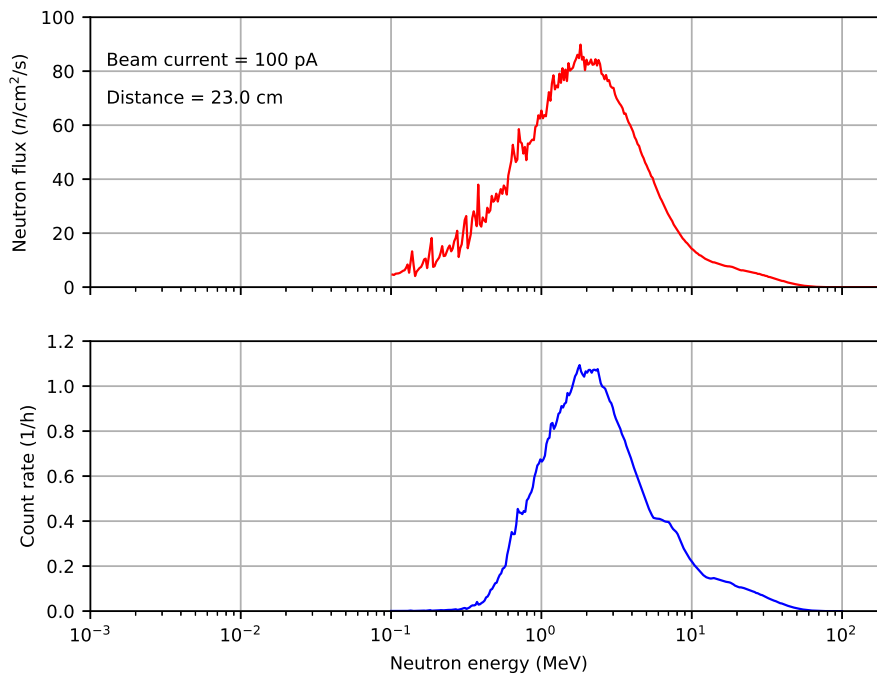


図 3-14 FC 設置位置における中性子収量および計数率分布

^{237}Np 核分裂計数管のガンマ線分析

使用する FC の中に性能に影響する不純物が含まれていないことを確認するため、可搬型の高純度ゲルマニウム半導体検出器を用いてガンマ線分析を令和 2 年度に実施した。図 3-15 にその測定の様子を示す。測定では、高純度ゲルマニウム半導体検出器の有感部の近傍に FC を置き、外部からの放射線（バックグラウンド）の影響を取り除くため、その周囲を厚さ 10~15 cm の鉛ブロックの遮蔽体で囲った。

図 3-16 に、測定の結果得られたガンマ線のエネルギースペクトルを示す。 ^{237}Np およびそのアルファ崩壊で生成された娘核種の ^{233}Pa （プロトアクチニウム 233）の放射性崩壊に起因するガンマ線とエクス線、および ^{60}Co に起因する 1.173 MeV および 1.333 MeV のガンマ線ピークの

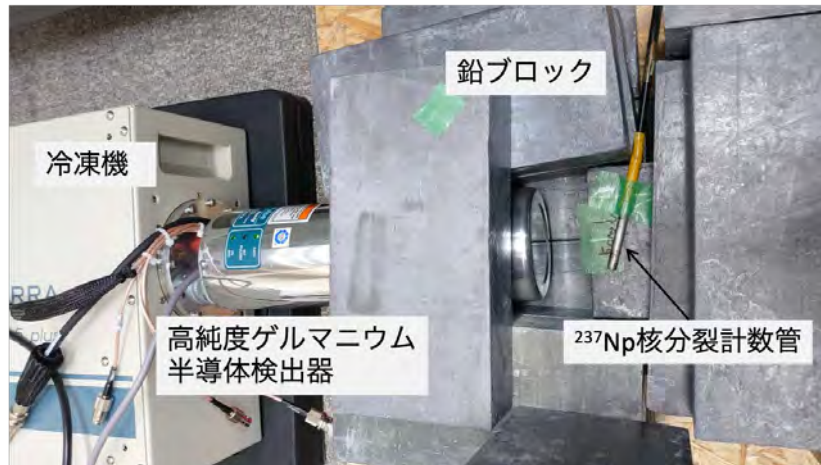


図 3-15 高純度ゲルマニウム半導体検出器による ^{237}Np 核分裂計数管のガンマ線測定の様子（撮影用に上部の鉛ブロックは取り除かれている）

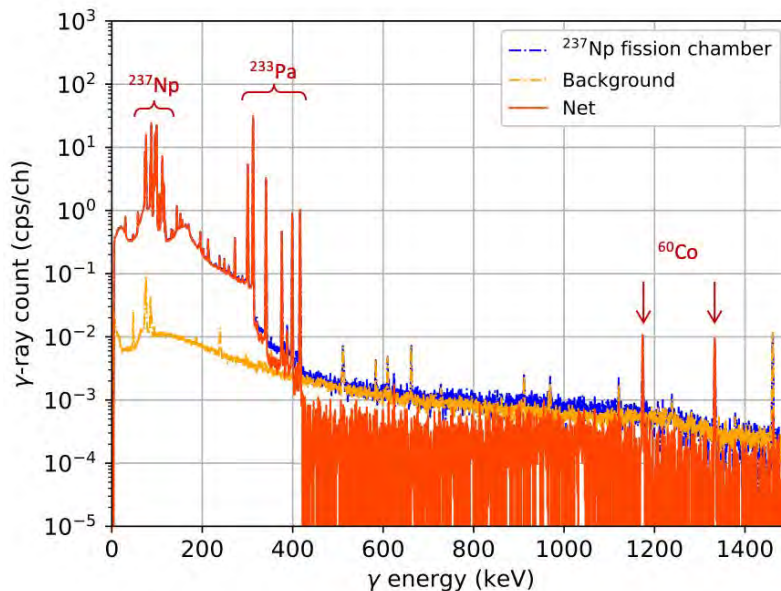


図 3-16 高純度ゲルマニウム半導体検出器で測定した ^{237}Np 核分裂計数管のガンマ線エネルギースペクトル（青線： ^{237}Np 核分裂計数管を置いたときの結果、橙線： ^{237}Np 核分裂計数管を置かないときの結果（バックグラウンド）、赤線：青線から橙線を差し引いたスペクトル）

みが観測され、 ^{237}Np の親核種である ^{241}Am およびその他の核分裂性核種の明確なピークは観測されなかった。このうち ^{60}Co （半減期 5.27 年）は、過去にこの FC を用いて原子力科学研究所で実施された中性子照射実験で、FC の構造金属材料である ^{59}Co と中性子との核反応（中性子捕獲反応）によって生成されたものであると考えられる。 ^{233}Pa の半減期は 26.967 日で、 ^{237}Np の半減期 214.4 万年に比べてきわめて短いため、両者の放射能は永続平衡の状態にある。すなわち、 ^{233}Pa の放射能は FC に塗布された ^{237}Np 放射能の検定登録量の 31.3 kBq に等しい。このときの ^{237}Np

に対する ^{233}Pa の原子核数比 $N_{233\text{Pa}}/N_{237\text{Np}}$ は、永続平衡の関係式

$$\frac{N_{233\text{Pa}}}{N_{237\text{Np}}} = \frac{\lambda_{237\text{Np}}}{\lambda_{233\text{Pa}}} \quad (3.1)$$

より 3.44×10^{-8} となる。ここで、 $\lambda_{237\text{Np}}$ および $\lambda_{233\text{Pa}}$ はそれぞれ ^{237}Np および ^{233}Pa の崩壊定数で、 $\lambda_{237\text{Np}} = 1.02 \times 10^{-14}$ [1/s] および $\lambda_{237\text{Np}} = 2.97 \times 10^{-7}$ [1/s] である。図 3-17 に JENDL-4.0 で評価された ^{233}Pa 核分裂断面積を示す。 ^{233}Pa の核分裂は約 1 MeV 以上の入射中性子エネルギー領域で生じるが、その断面積は ^{237}Np の核分裂断面積 (図 3-18) よりも小さい。これと先述の ^{233}Pa の原子核数比 3.44×10^{-8} より、 ^{233}Pa に起因する核分裂事象は、 ^{237}Np に起因する核分裂事象に比べて無視できるほど小さいことがわかった。以上の結果から、FC の性能に影響する核分裂性核種は存在しないことを確認した。

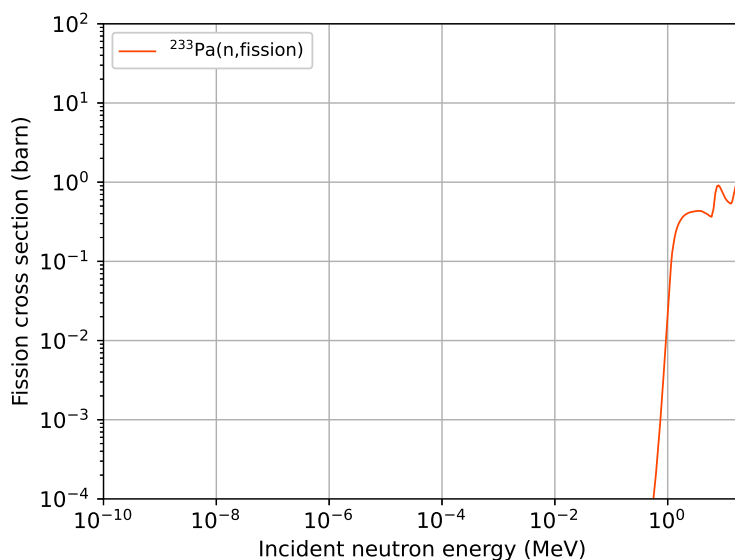


図 3-17 ^{233}Pa 核分裂断面積評価値 (JENDL-4.0 の評価値)

^3He 比例計数管を用いた電磁波ノイズの影響調査試験【R2】

FC を用いた測定において、FFAG 加速器の構成機器であるキッカー電磁石に起因する電磁波ノイズの影響が懸念されたため、令和 2 年度に代替の ^3He 比例計数管を用いて、FFAG 加速器の運転環境下における電磁波ノイズの影響を調査した。図 3-19 に測定体系および測定回路を示し、図 3-20 に ^3He 比例計数管および周辺装置の外観を示す。電磁波ノイズ対策として、測定で使用した高圧電源装置およびプリアンプ電源装置は、ノイズ遮断定電圧低周波電源装置 (CVCF: Constant Voltage Constant Frequency) に接続した。 ^3He 比例計数管は、FC と同じガス検出器の一種であり、熱中性子領域に高い感度を持つ中性子検出器である。ここでは ^{252}Cf 中性子源を ^3He 比例計数管の直近のポリエチレンブロック上に置き、FFAG 加速器の運転環境下において、 ^3He 比例計数管を用いて検出される ^{252}Cf の自発核分裂中性子事象の波形をオシロスコープで確認し、その波高分布をマルチチャンネルアナライザ (MCA: Multi-Channel Analyzer) を用いて観測した。

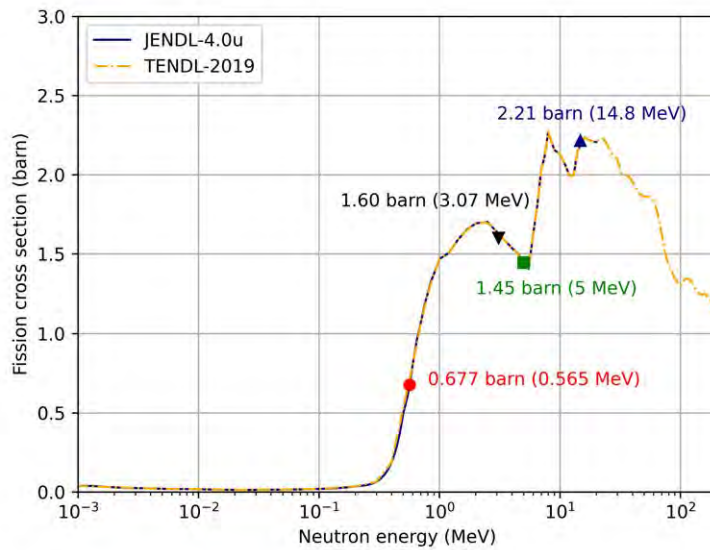


図 3-18 ^{237}Np 核分裂断面積評価値 (JENDL-4.0 および TENDL-2019 の評価値)

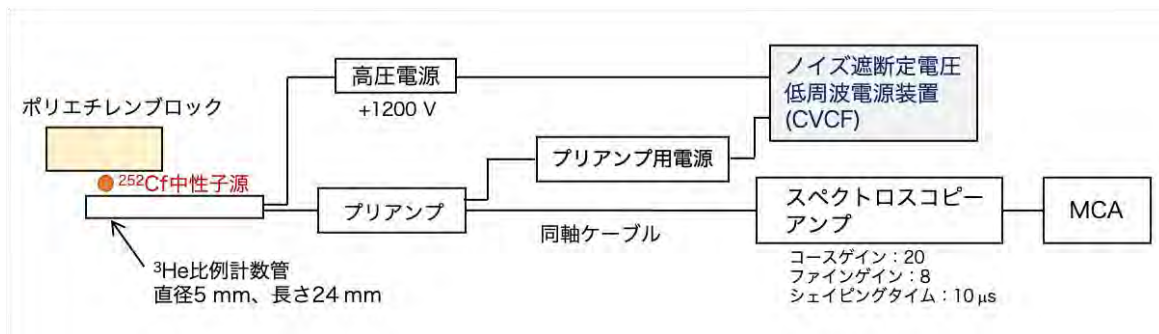
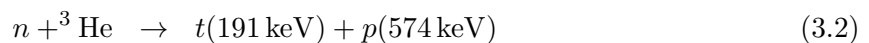


図 3-19 ^3He 比例計数管を用いた電磁波ノイズ影響試験の測定体系および測定回路の模式図

図 3-21 に中性子検出事象の波形の一例を示すように、キッカー電磁石に起因する電磁波ノイズが観測されたが、その影響は中性子の検出事象に比べて十分低いことを確認した。図 3-22 に、キッカー電磁石をオンおよびオフにした場合、および ^{252}Cf 中性子源を置いた場合と置かない場合の 4 通りにおける MCA による ADC 波高分布を示す。この図より、450 ch をピークとする ^3He 比例計数管の $^3\text{He}(n,p)$ 反応事象のスペクトルに加えて、キッカー電磁石をオンにしたときに、ADC チャンネルで 100 ch 付近にキッカー電磁石に起因する電磁波ノイズが観測された。450 ch のピーク位置は、 $^3\text{He}(n,p)$ 反応



による核反応生成物 (陽子 p および三重陽子 t) の全運動エネルギー 765 keV に相当する。核分裂片のエネルギー付与分布のピークは 100 MeV から 125 MeV 付近にあるため、キッカー電磁石に起因する電磁波ノイズの波高は、核分裂生成物の検出事象の波高に比べると無視できるほど小さい。すなわち、FC を用いた核破碎中性子場の測定における電磁波ノイズの影響は無視できると考

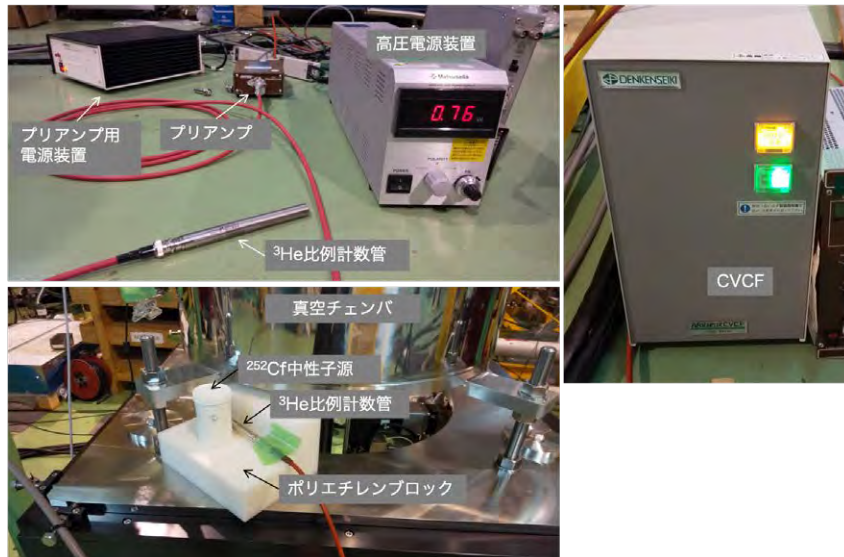


図 3-20 ^3He 比例計数管と周辺装置の外観（左上および右上）および測定時の ^3He 比例計数管と ^{252}Cf 中性子源の配置（左下）

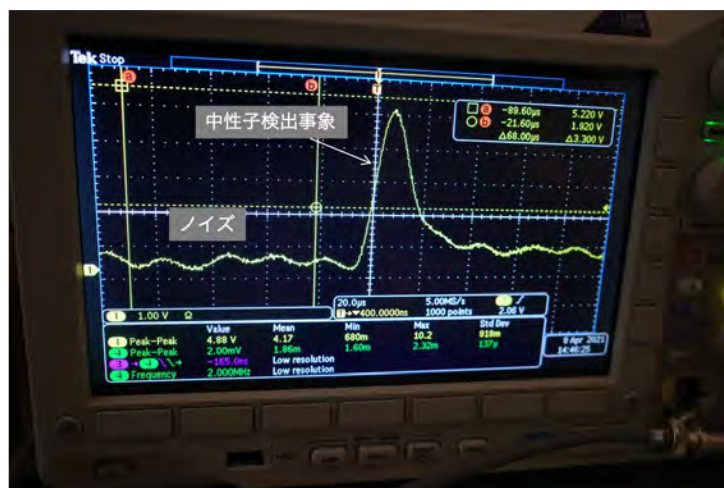


図 3-21 オシロスコープで観測された ^3He 比例計数管による中性子検出事象の波形

えられる。

(3) 実験条件に関する検討【R1】

令和元年度に、中性子測定実験（TTNY 測定実験および DDX 測定実験）における計数率や測定時間などの実験条件に関する検討を実施した。以下にその検討内容と検討結果を示す。

TTNY 測定条件に関する検討

厚い鉛およびビスマス標的に対する各測定角度の 1 nA あたりのスペクトル強度の核反応モデル INCL4.6/GEM による解析値を図 3-23 に示す。鉛とビスマス標的の間に大きな差異は見られな

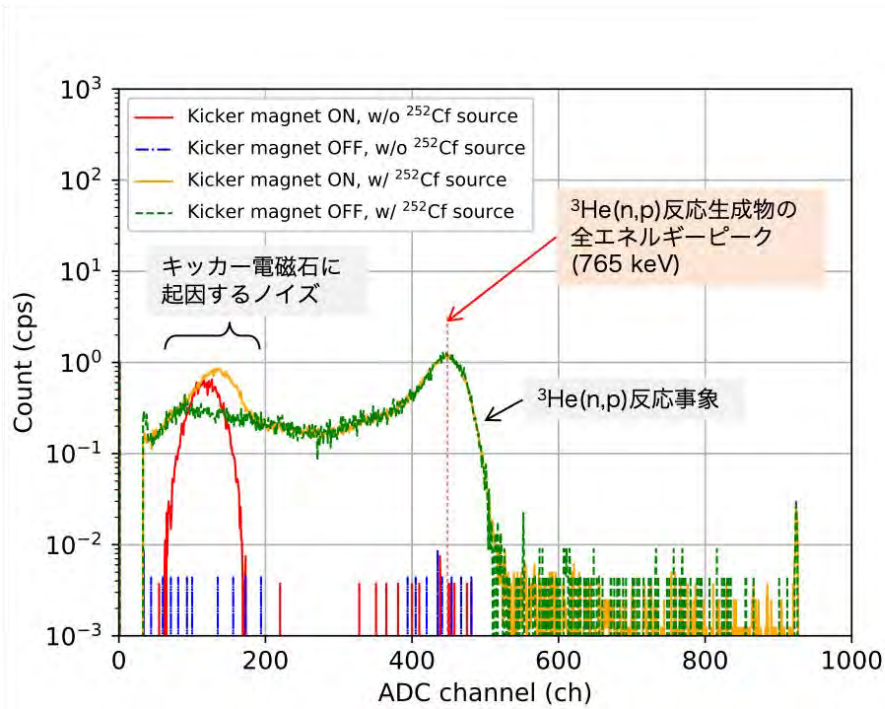


図 3-22 ^{252}Cf 自発核分裂中性子に対する ^3He 比例計数管の ADC 波高分布 (赤線: キッカー電磁石オン、 ^{252}Cf なし、青線: キッカー電磁石オフ、 ^{252}Cf なし、橙線: キッカー電磁石オン、 ^{252}Cf あり、緑線: キッカー電磁石オフ、 ^{252}Cf あり)

かったため、ここでは実験条件として、FFAG 加速器の運転で一般的に用いられるビーム条件 (繰り返し 30 Hz および電流 1 nA) と 15° 方向に放出される中性子エネルギースペクトルを用いた。

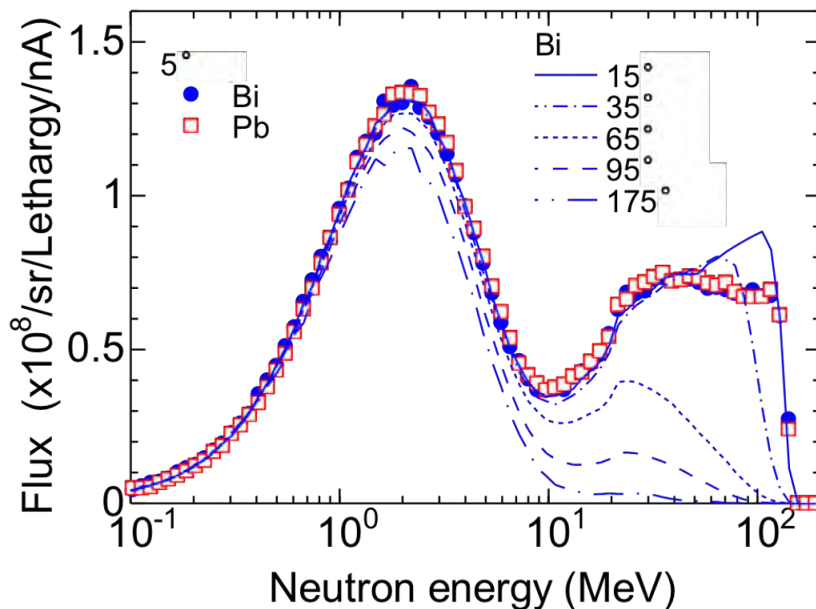


図 3-23 TTNy 実験における各測定角度での中性子スペクトル分布

実験では時間応答の速い液体有機シンチレータを用いる。検出器の立ち上がり時間は数 ns 程度

であるが、シンチレーション光の遅発成分が 400 ns 程度となるため、計数率が高い場合には信号がパイルアップする可能性がある。そのため、経験的に毎秒 1×10^6 カウントより高い計数率となる場合には、パイルアップの影響を防ぐことができない。図 3-24 に、ビスマス標的を用いた TTTY 測定で、 15° の測定角度で見込まれる 1 nA の陽子ビーム 1 ショットに対する計数率を示す。ここで横軸は中性子の運動エネルギーを表す。厳密な評価には、入射陽子ビームのパルス幅が必要となるが、ここでは計数率に対して保守的な評価を行うため、パルス幅は無限小として扱い、中性子の飛行時間分布より計数率を求めた。パイルアップが問題とならないためには、計数率を毎秒 1×10^6 カウント以下とすることが要求されるため、これを限界値として図に示した。検出器の立体角と中性子が検出器到達に至るまでの時間の広がりにより、計数率は距離の 3 乗に反比例する。また、計数率は蒸発中性子の 2 MeV 付近でピークとなり、その次に 100 MeV 付近で高い。

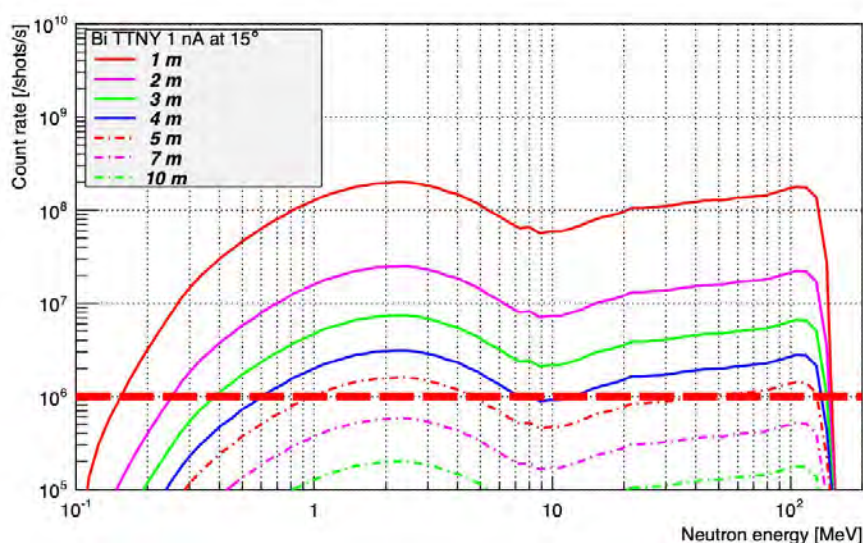


図 3-24 任意の飛行距離に対する計数率の評価結果 (太い赤破線にパイルアップを防ぐ計数率 毎秒 1×10^6 カウントを示す)

図 3-24 より、1 nA のビーム強度で TTTY の実験を行うには、飛行距離を 10 m 以上とすることが望ましいが、実際の実験室の状況を考慮すると、10 m 以上の飛行距離を設けるのは困難なため、次にビーム電流を減らしてパイルアップを防止することを考慮した。

図 3-25 に、1 nA で 1,000 秒照射した際の任意の飛行距離に対する計数を示す。図の縦軸には、測定した運動エネルギーの 10% を幅 (エネルギービン幅) として積算した値を示す。ここで測定結果の統計誤差を 2 MeV のピークにおいて 1% となる場合について検討する。この条件を満たすには 10^4 カウント以上の統計が必要となる。この値を図中の破線として示す。図 3-25 に示すエネルギー毎の計数は、飛行距離の 2 乗に反比例するため、図 3-24 に示す計数率とは形状がわずかに異なるが、いずれも 2 MeV 付近で最大となった。図 3-25 より、飛行距離 4 m の場合にはピークエネルギーにおいて 1,000 秒間程度の測定時間で十分となる。ただし、飛行距離 4 m の場合で 1 nA を用いる場合には、図 3-24 の結果からパイルアップが問題となるため、パイルアップを生じずに測定できるビーム電流に関して次に考察した。

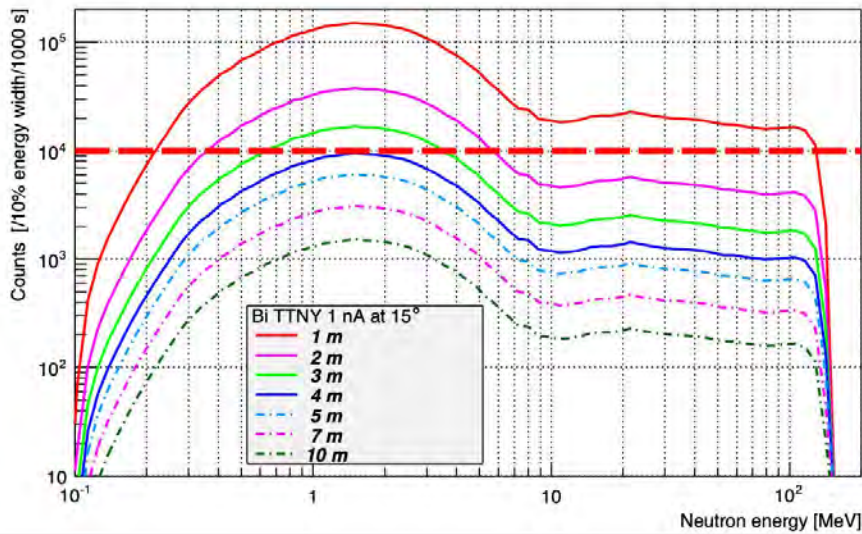


図 3-25 任意の飛行距離に対する計数とエネルギーの関係（ビーム電流 1 nA において 1,000 秒間のデータを蓄積した値を示す）

パイルアップを生じずに測定できるビーム電流を任意の飛行距離および任意の飛行距離に対して 2 MeV 付近で 1% の統計誤差となる測定時間を調査した。その結果を図 3-26 に示す。図では横軸に飛行距離を示し、各飛行距離に対して計数率が毎秒 1×10^6 カウント以下となりパイルアップを生じないビーム電流を緑実線で示す。ビーム電流 1 nA においてパイルアップの発生を無視した計数時間を図中の黒実線に示すが、パイルアップの防止により赤破線の時間が必要となり、ビーム出力を大幅に低下し長時間の測定が必要となることが判明した。ただし、計数率は飛行距離の 3 乗に反比例するため、距離を離すことによりパイルアップが許容できるビーム電流は距離の 3 乗に比例する。計数の統計は距離の 2 乗に反比例するため、パイルアップを防止したビーム電流条件では、測定時間は図の赤破線に示すように距離に反比例する。飛行距離をさらに伸ばすことでエネルギー分解能は向上するものの、室内散乱によるバックグラウンドの増加や実験室の大きさを考慮し、飛行距離を 6 m 程度とした。この場合、ビーム電流は 100 pA 程度で十分であり、ビーム電流を 100 pA とすれば 1 nA の場合と比べて加速器調整における自由度は増加する。これらの条件で十分な統計を得るには約 40 時間 (2×10^5 s) の測定が必要となるが、この時間は FFAG 加速器における約一週間の平日日中の連続運転期間と等しくなるため、上記条件で実験を進めることに問題はないと考えられる。

以上の考察により、TTNY 測定ではビーム電流を 100 pA、飛行距離を 6 m として実験を行う予定とした。

DDX 測定条件に関する検討

以上、TTNY 測定の条件に関して評価した。ここで、DDX 測定の条件を簡単に評価する。DDX の中性子強度は TTNY に比べて数%程度となるため、DDX の測定では、ビーム強度を TTNY 測

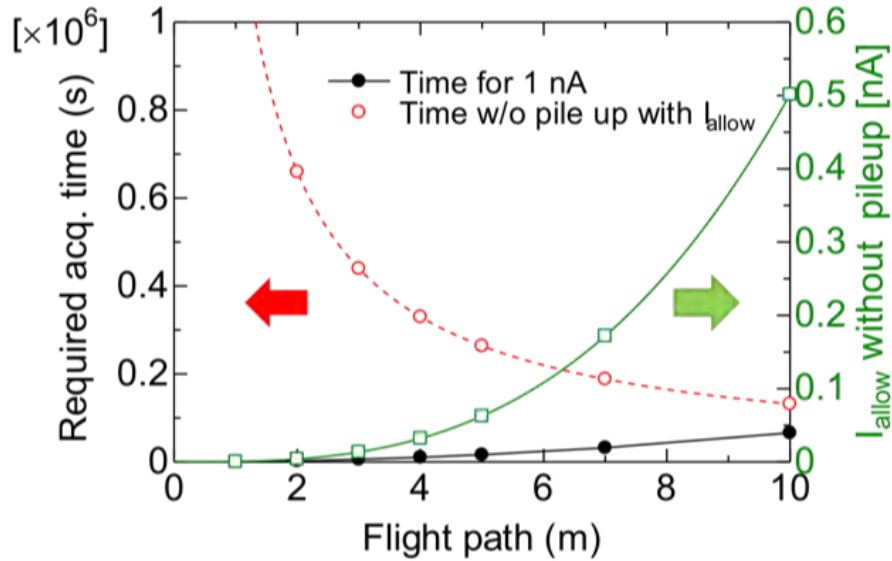


図 3-26 パイルアップを生じないビーム電流、飛行距離および計数時間の関係（黒実線：1 nA における計数時間、緑実線：パイルアップを生じない電流、赤破線：パイルアップを生じない電流でピーク値で1%の統計誤差を満足する計数時間をそれぞれ示す）

定の数十倍となる 1 nA とすればよい。ただし、加速器におけるビームロスやビームダンプからの中性子の寄与は TTNy に比べて敏感になるので、DDX の測定ではこれらの影響に注意する必要がある。したがって、効率的でスムーズな実験を行うには、比較的容易な TTNy 測定から実施し、TTNy 測定で様々な知見を蓄積したのちに DDX 測定を実施するとよい。

DDX および TTNy の測定では飛行時間法により中性子のエネルギーを決定するため、パルス幅の短いビームが必要となる。ここで、実験に必要なパルス幅に関して検討した。各飛行距離とパルス幅に対するエネルギー分解能を、以下の式を用いて評価した。

$$\frac{\delta E_n}{E_n} = \gamma(\gamma + 1) \sqrt{\left(\frac{\delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2} \quad (3.3)$$

ここで、 δE_n はエネルギー分解能（単位：MeV）を表し、 δt 、 δL はそれぞれ時間分解能（単位：s）と飛行距離の不確かさ（単位：m）を表す。評価結果を図 3-27 に示す。本評価において、飛行距離の不確かさには検出器の厚さの半分となる 10 mm および TTNy の測定で想定する標的の厚さ (10 mm)²の半分となる 5 mm を仮定した。

実験と PHITS との比較検討のためには、エネルギー分解能をせいぜい数十%にする必要があると考えられるため、この値を基準に考察した。図 3-27 の結果より、数十 MeV 領域でエネルギー分解能を数十%とするためには、飛行距離 5 m（図中の緑色）で時間分解能を 20 ns（図中の太い破線）以下とする必要があり、この値を満たすビームのパルス幅が要求される。飛行距離 10 m に伸ばしてもエネルギー分解能はあまり改善しないので、分解能の向上には短パルス化が重要となる。

²実際の TTNy 測定では陽子ビームを確実に止める必要があったため、保守的に 30 mm の厚さのものを用いた。

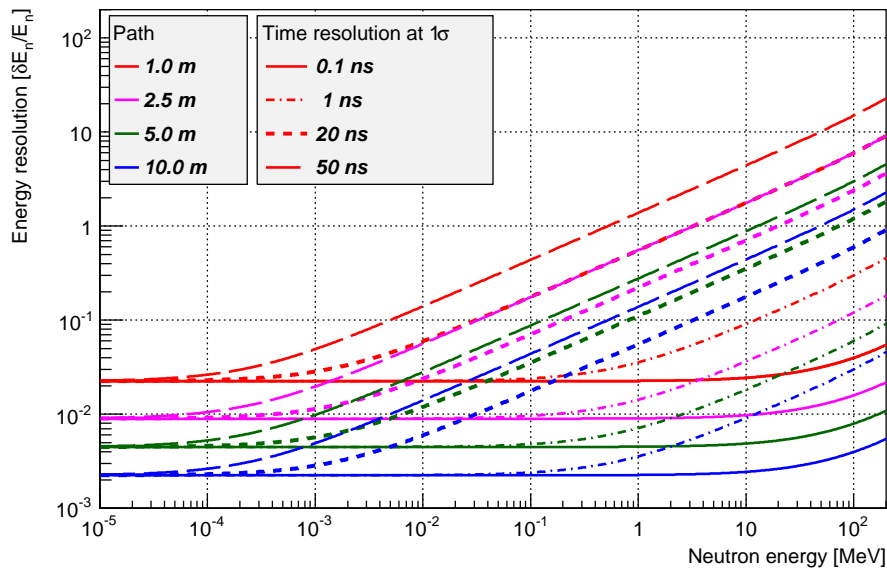


図 3-27 パルス幅、飛行距離およびエネルギー分解能（相対値）の関係（飛行距離 1.0, 2.5, 5.0 および 10 m（赤色、紫色、緑色および青色）に対し、1 σ における時間分解能が 0.1, 1, 20 および 50 ns となる値を示す）

(4) シャドーバーの検討、設計および製作【R1-R2】

TTNY および DDX の測定では、標的から放出される中性子の他にも、標的以外の周辺の機器や室内壁から散乱された中性子が中性子検出器に入ってくる。この中性子を「室内散乱中性子」と呼ぶ。そのため、目的とする TTNY および DDX を得るには室内散乱中性子の影響を次に示す方法によって取り除く必要がある。

まず、標的と中性子検出器との間に、ある一定の長さの金属の棒を置いたときと置かないときの2つのケースで測定を行う。この金属棒を「シャドーバー」と呼ぶ。以下では、遮蔽体を置かないで測定することを「フォアグラウンド測定」、遮蔽体を置いて測定することを「バックグラウンド測定」と呼ぶ。次に、フォアグラウンド測定により得られる中性子収量からバックグラウンド測定により得られる中性子収量を差し引くことで、室内散乱中性子の寄与を排除できる。

図 3-28 に、任意長さの鉄を用いたときの中性子検出器に検出される中性子収量の PHITS による解析値を示す。この図では、中性子エネルギーが 1 MeV、10 MeV および 100 MeV のときの減衰を示している。金属棒は密度が高くて長いものほど遮蔽効果が高いが、安価なステンレスを採用し、棒の長さは持ち運びが容易で、どのエネルギーに対しても中性子を 1%未満に減衰させることのできる 1 m を採用した。図 3-29 にシャドーバーとそれを置く架台の設計図面を示すように、シャドーバーを置く架台は移動が容易なキャスター付きとし、シャドーバーを容易に取り外し可能な構造とした。製作したシャドーバーの写真を図 3-30 に示す。

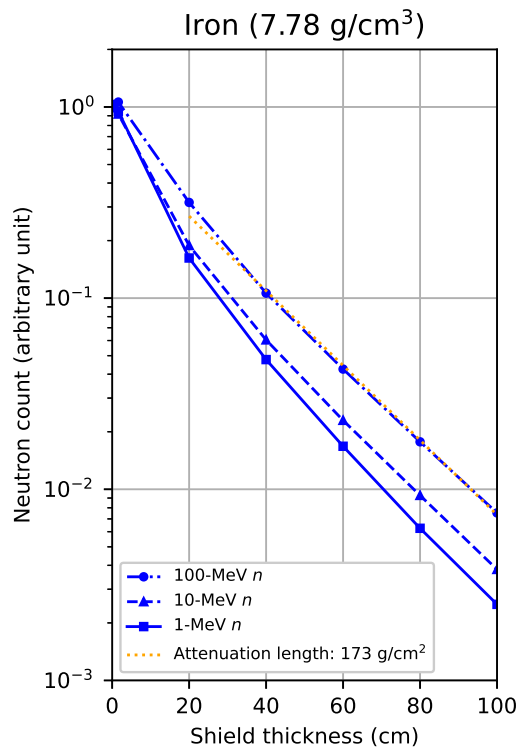


図 3-28 任意長さの鉄を用いたときの検出される中性子収量の減衰（橙色の点線は簡易計算による解析値）

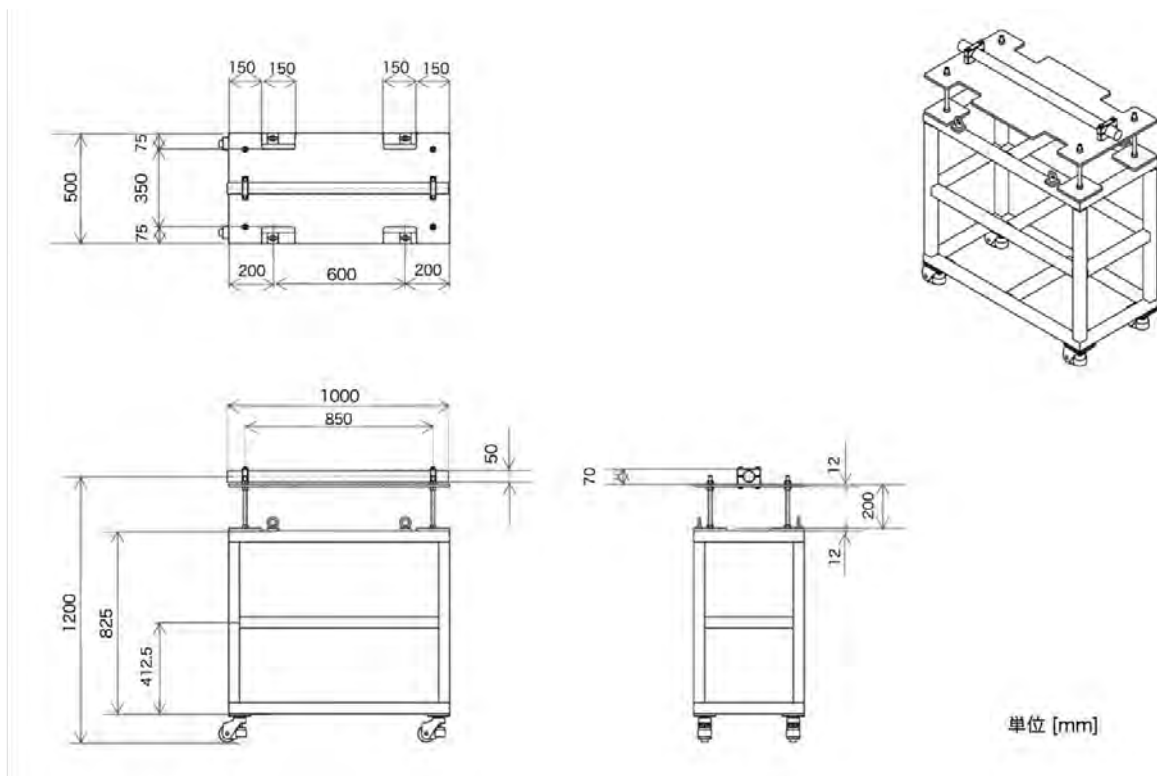


図 3-29 シャドーバーと架台の設計図面



図 3-30 製作したシャドーバーおよび架台の写真

(5) 真空チェンバの設計、製作および据え付け【R1-R2】

DDX の測定および高エネルギー核分裂実験で使用する真空チェンバを令和 2 年度に製作し、これを FFAG 加速器施設のビームライン上に据え付けた。製作にあたっては以下の条件を満たす仕様とした。

- 真空チェンバの寸法は、核分裂片質量数分布測定用の MCP および MWPC がチェンバ内に収まる大きさとする（直径 600 mm）。
- 真空チェンバを固定する架台は、据え付け時に周辺の機器と干渉しない構造とする。
- 真空チェンバの中心に標的試料ホルダを設け、標的試料の高さを外部から操作および調整できる構造とする。
- 測定中にビーム形状（プロファイル）を観測できるようにビューポートを設ける。
- 真空チェンバ側面の構造材による標的から放出される中性子の影響をできる限り抑えるように、真空チェンバ側面の厚さは 4 mm とする
- 十分な真空が保たれるように、許容リークは 1×10^{-10} Pa · m³/s 以下とする。

図 3-31、図 3-32 および図 3-33 に、それぞれ真空チェンバ、標的試料を固定するための標的試料ホルダおよび真空チェンバを支持するための架台の設計図面を示し、図 3-34 に、実際に製作した真空チェンバの外観を示す。製作した真空チェンバをビームライン上の図 3-35 に示した位置に据え付けた。据え付け後の真空チェンバの外観を図 3-36 に示す。据え付け後、真空リーク試験を実施し、重大な真空漏れがないことを確認した。

TTNY の測定において、標的試料をこの真空チェンバの中心に設置すると、厚い標的が新たな放射線源となり、放射線の許可申請が必要となる。そこで許可申請に要する膨大な時間と労力を避けるために、TTNY の測定では、FFAG 加速器施設に設置された既存の真空チェンバ (図 3-37) を用いて実施することとした。

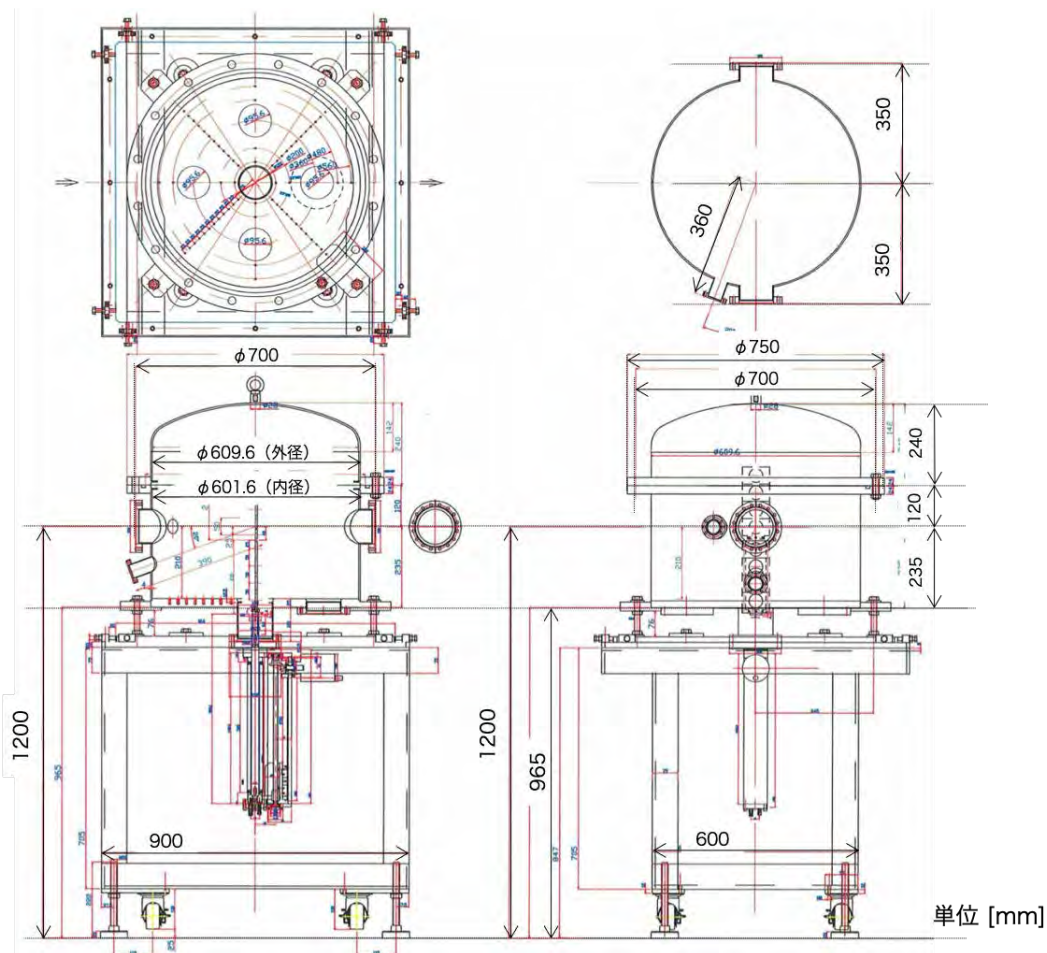


図 3-31 製作した真空チェンバの設計図面 (全体図)

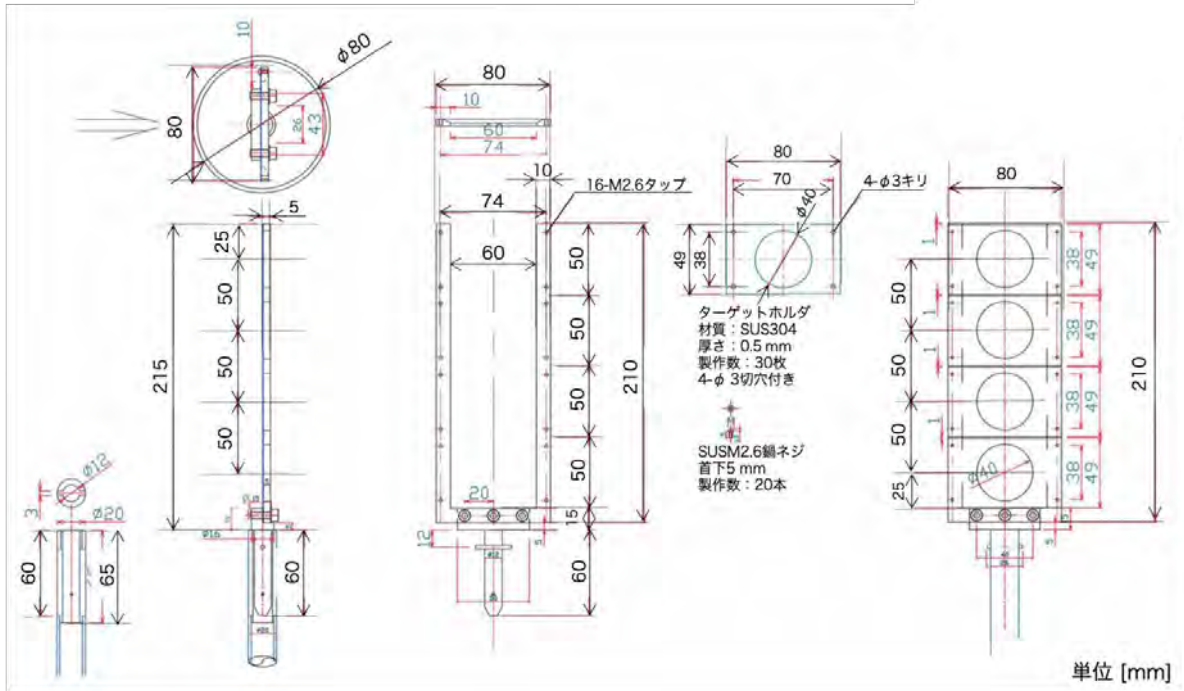


図 3-32 製作した真空チェンバのうち、標的試料ホルダの設計図面

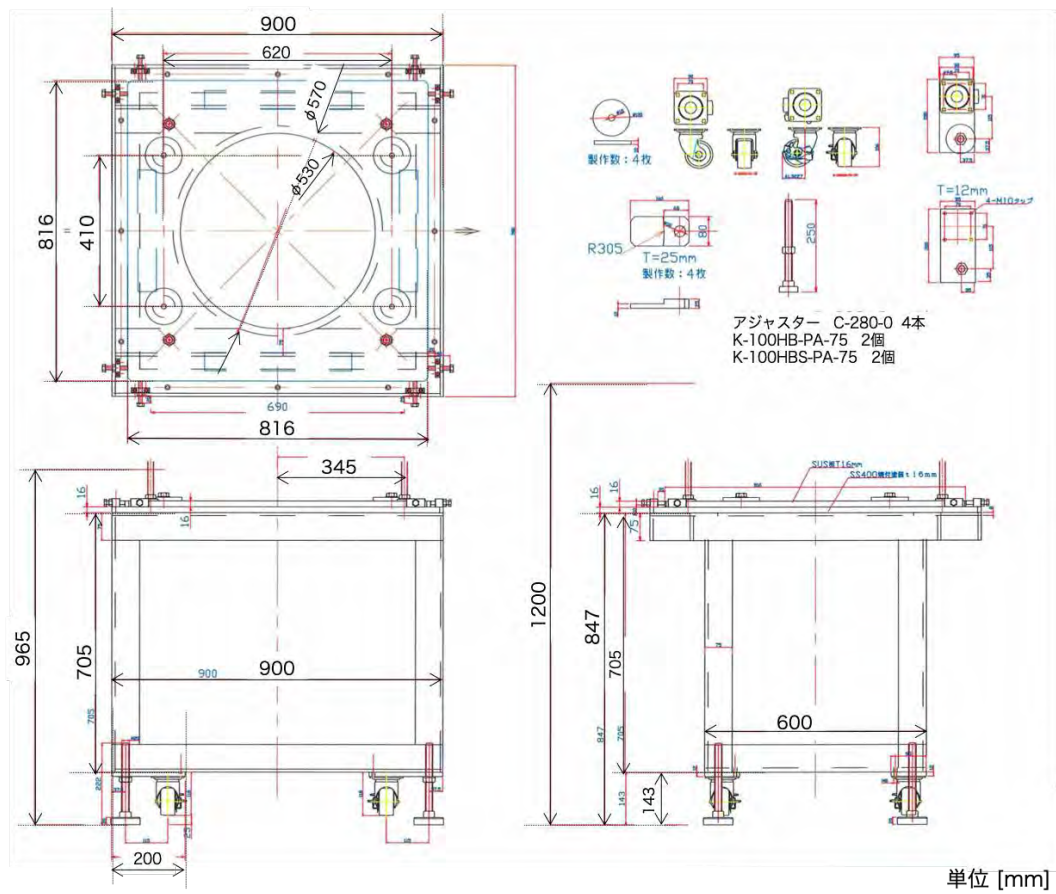


図 3-33 製作した真空チェンバのうち、架台の設計図面



図 3-34 製作した真空チェンバの写真

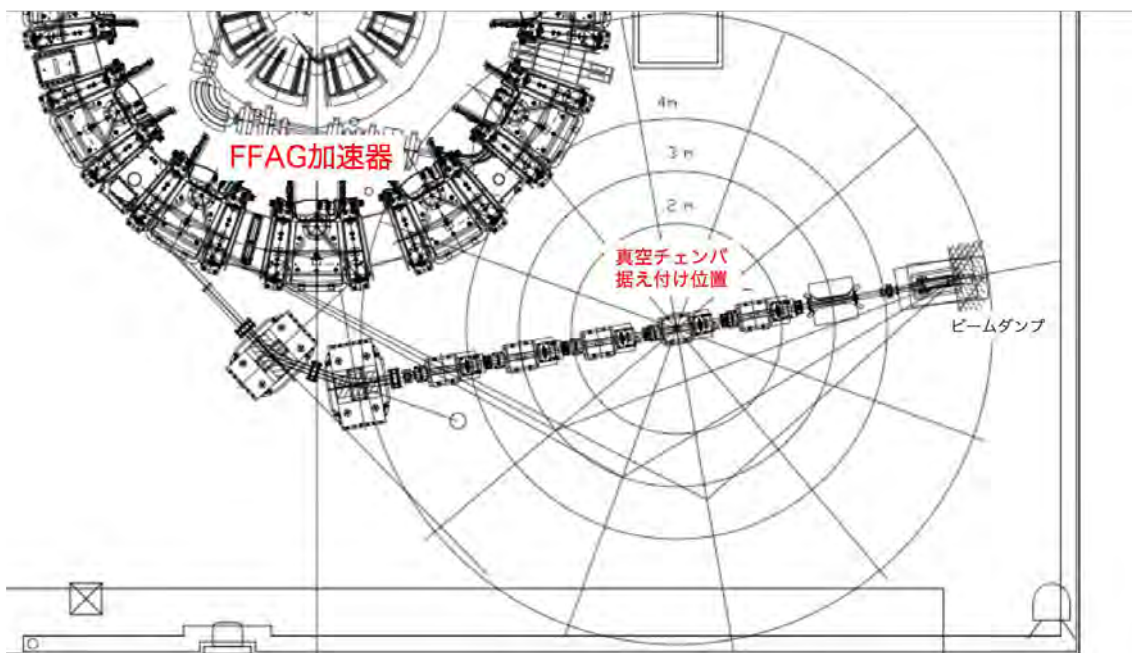


図 3-35 真空チェンバの据え付け位置

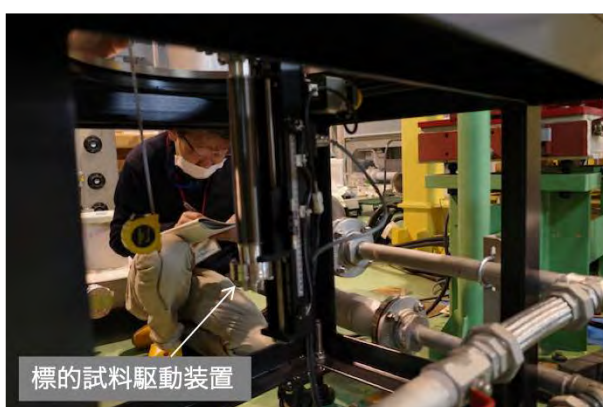


図 3-36 据え付け後の真空チェンバ



図 3-37 TTNY 測定用真空チェンバの外観

(6) 理論モデルによる DDX および TTNY の解析【R3】

理論モデルおよび解析条件

核破砕反応は、時間的なプロセスに基づいて、「核内カスケード（直接・前平衡）過程（intranuclear cascade (direct and preequilibrium) process)」と「脱励起過程（de-excitation process）」の2つに分類される。それぞれのプロセスにおいて、中性子が放出されるメカニズムとそれを説明するモデルは異なる [3.1-12]。すなわち、核内カスケード過程では、入射粒子が原子核に衝突した後、入射粒子と核内の核子がビリヤードの球のように衝突を繰り返しながら中性子や中間子などの粒子が放出される。一方、脱励起過程では、衝突後に平衡状態に達した高励起の原子核が安定化する過程で中性子やガンマ線が放出される。

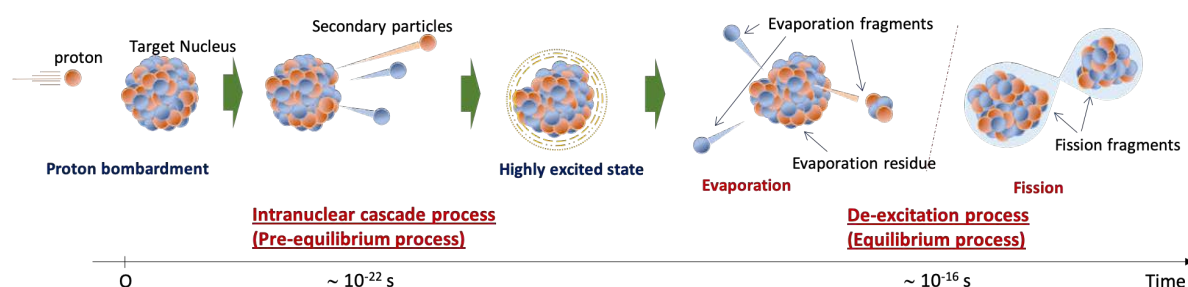


図 3-38 核破砕反応のプロセス [3.1-12] (核破砕反応は時間的なプロセスに基づいて核内カスケード過程 (intranuclear cascade process) と脱励起過程 (de-excitation process) に分けられる)

PHITS は、核内カスケード過程および脱励起過程を確率論的に記述するモデルとしてそれぞれ INCL4.6 (Liège Intranuclear Cascade version 4.6) [3.1-13] と一般化蒸発モデル GEM (Generalized Evaporation Model) [3.1-14] と呼ばれる核反応モデルを組み合わせたものを標準仕様 (デフォルト) モデルに採用している (バージョン 2.30 以前は、核内カスケード過程を記述するモデルに Bertini INC [3.1-15] モデルが採用されていた)。このモデルは GeV 領域の陽子入射反応に対して実験値をよく再現することが知られている。およそ 200 MeV がこのモデルの限界とされるが、14 MeV まで適用可能とする論文もあり、その予測精度については明らかになっていない [3.1-16][3.1-17][3.1-18]。PHITS には、INCL4.6 や Bertini INC モデルの他に、核子を量子論的なガウス関数型の波束とみなして核内カスケード過程を確率論的かつ分子動学的に記述する量子分子動力学 (JQMD: JAERI Quantum Molecular Dynamics) [3.1-19] モデルも組み込まれているが、200 MeV 未満の入射エネルギー領域の陽子入射反応に対するこのモデルの妥当性については不明な点が多い。一方、上記の核反応モデリングの問題を回避するために、低エネルギー領域入射反応の記述が可能な核反応モデルが組み込まれた核データ評価コード CCONE [3.1-20] などを用いて評価した評価済み高エネルギー核データライブラリ JENDL-4.0/HE [3.1-21] が開発された。PHITS では上述の核反応モデルに加えて、JENDL-4.0/HE を核反応の計算に利用することができる。

PHITS のバージョン 3.26 [3.1-6] を用いて、鉄、鉛およびビスマス標的に対する DDX および TTNY のエネルギースペクトルを求めた。表 3-6 に、本解析で使用した核反応モデルを示す。DDX および TTNY 測定用の標的 (薄い標的および厚い標的) は、実験で実際に使用したものをモデル化した。表 3-7 に、解析対象の標的の仕様を示す。陽子ビームのエネルギーは実験で使用した 107

MeV とし、入射陽子のすべてが標的に当たるように、直径 10 mm の円柱状のビームをモデル化した。

表 3-6 解析対象の核反応モデル

| モデル名 | 陽子入射・20 MeV 以上中性子入射反応 | | 20 MeV 未満中性子入射反応 |
|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|
| | 核内カスケード過程 | 脱励起過程 | |
| INCL4.6/GEM | INCL4.6 [3.1-13] | GEM [3.1-14] | JENDL-4.0 [3.1-10] |
| Bertini/GEM | Bertini INC [3.1-15] | GEM [3.1-14] | JENDL-4.0 [3.1-10] |
| JQMD/GEM | JQMD [3.1-19] | GEM [3.1-14] | JENDL-4.0 [3.1-10] |
| JENDL-4.0/HE | JENDL-4.0/HE [3.1-21] | | JENDL-4.0/HE [3.1-21] |

表 3-7 解析対象の標的

| | 鉄標的 | 鉛標的 | ビスマス標的 |
|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| TTNY 測定用標的 (厚い標的) 厚さ | 30 mm | 30 mm | 30 mm |
| DDX 測定用標的 (薄い標的) 厚さ | 2 mm | 2 mm | 5 mm |
| 直径 (TTNY および DDX 測定共通) | 48 mm | 48 mm | 48 mm |
| 密度 | 7.79 g/cm ³ | 11.34 g/cm ³ | 9.78 g/cm ³ |
| 原子量 | 55.85 | 207.2 | 208.9804 |

理論モデルによる解析結果

図 3-39、図 3-40 および図 3-41 に、理論モデルによる TTTY のエネルギースペクトルおよび角度分布 (単位: [1/sr/lethargy/proton]) を示す。さらに、図 3-42、図 3-43 および図 3-44 に、理論モデルによる DDX のエネルギースペクトルおよび角度分布 (単位: [mb/sr/lethargy]) を示す。ここで、DDX は核反応で放出される中性子収量の放出エネルギーおよび放出角に対する二重微分量で原子核固有の物理量であるのに対し、TTNY は、標的から放出される中性子収量の二重微分量で、標的の密度や形状が反映された工学的な物理量である。DDX の角度分布で 90° 付近に凹みが見られるが、これは標的の厚さに起因するもので、原子核固有の物理量として評価するためには無限小の厚さでの解析あるいは補正が必要である。10 MeV 以上およびそれ以下のエネルギー領域で見られるスペクトルはそれぞれ核内カスケード過程および脱励起過程で放出される中性子に起因している。以下に、それぞれの過程で放出される中性子収量のエネルギースペクトルおよび角度分布に関する特徴を示す。

- 核内カスケード過程で放出する中性子は、前方性の強いスペクトル (前方に行くほど中性子を多く含むスペクトル) を形成する。図 3-39、図 3-40 および図 3-41 の右側のパネルより、中性子エネルギーが高くなるほど前方性の傾向が顕著になる。理論モデルによる解析値どうしを比較すると、その傾向に差異が見られる。特に、前方角で見られる、核内カスケード過程で原子核内の核子と入射陽子との 1 回の衝突 (これを「準弾性散乱」と呼ぶ) で生じる

ピークの位置および形状は、モデル間の差異が顕著である。INCL4.6、Bertini INC モデルおよび JENDL-4.0/HE では 10 MeV から 20 MeV 付近のスペクトルにくびれが見られるのに対し、JQMD ではくびれは見られない。

- 脱励起過程で放出する中性子は放出角に大きく依存せず、等方性の強いスペクトルを形成する。この過程で放出する中性子は、熱した液滴から蒸発する水分子のように振る舞うため、「蒸発中性子」と呼ばれ、脱励起過程は「蒸発過程」とも呼ばれる。原子核内に中性子を多く含むほど中性子は蒸発しやすくなるため、鉄よりも質量数の大きい鉛やビスマスの方が多くの中性を放出する。蒸発中性子量のモデル間の差異は鉛およびビスマスで顕著である。

以上の特徴は DDX と TTNYY で共通しているが、放出角 5° の最前方で DDX と TTNYY の結果に差異が見られた。

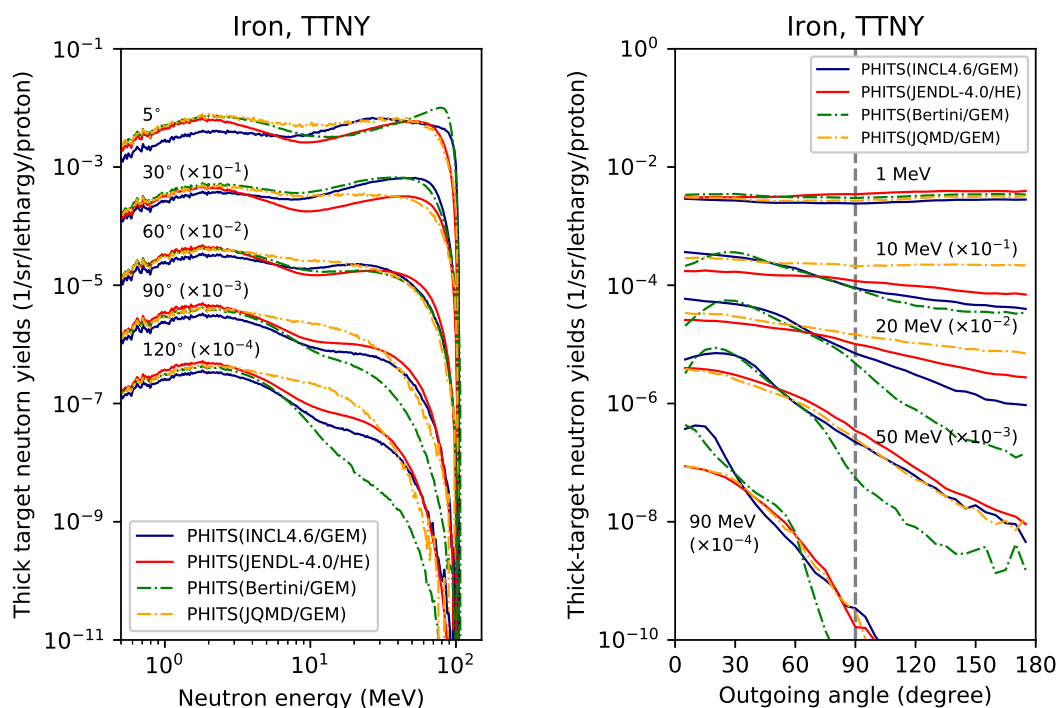


図 3-39 鉄標的に対する TTNYY エネルギースペクトル解析値 (左) および TTNYY 角度分布解析値 (右)

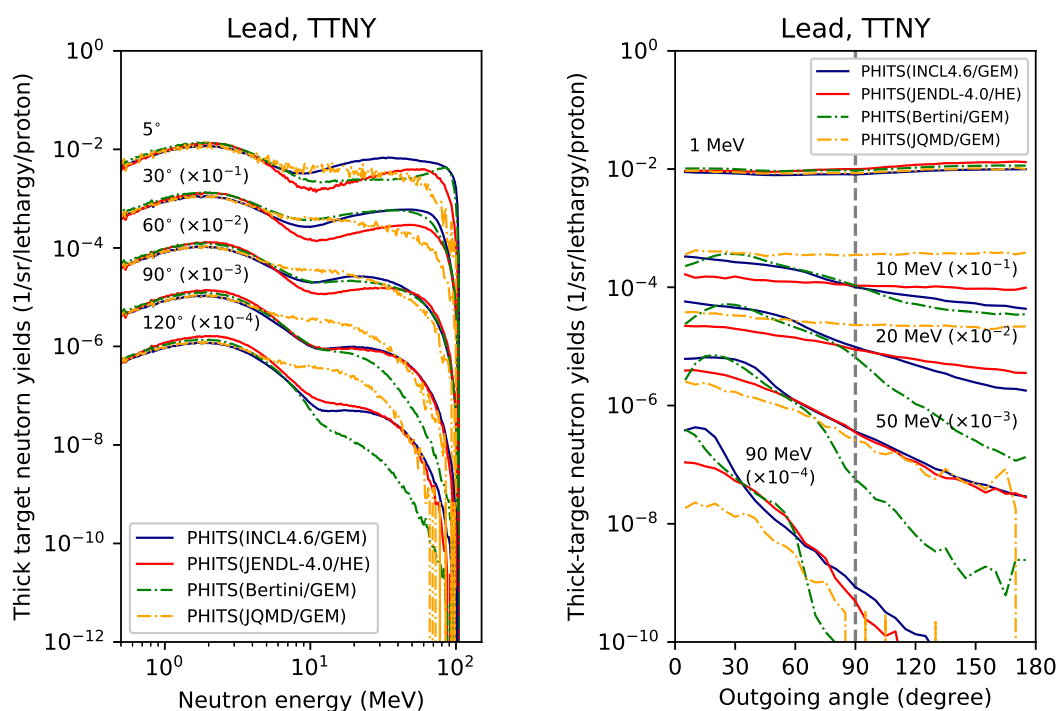


図 3-40 鉛標的に対する TTNY エネルギースペクトル解析値 (左) および TTNY 角度分布解析値 (右)

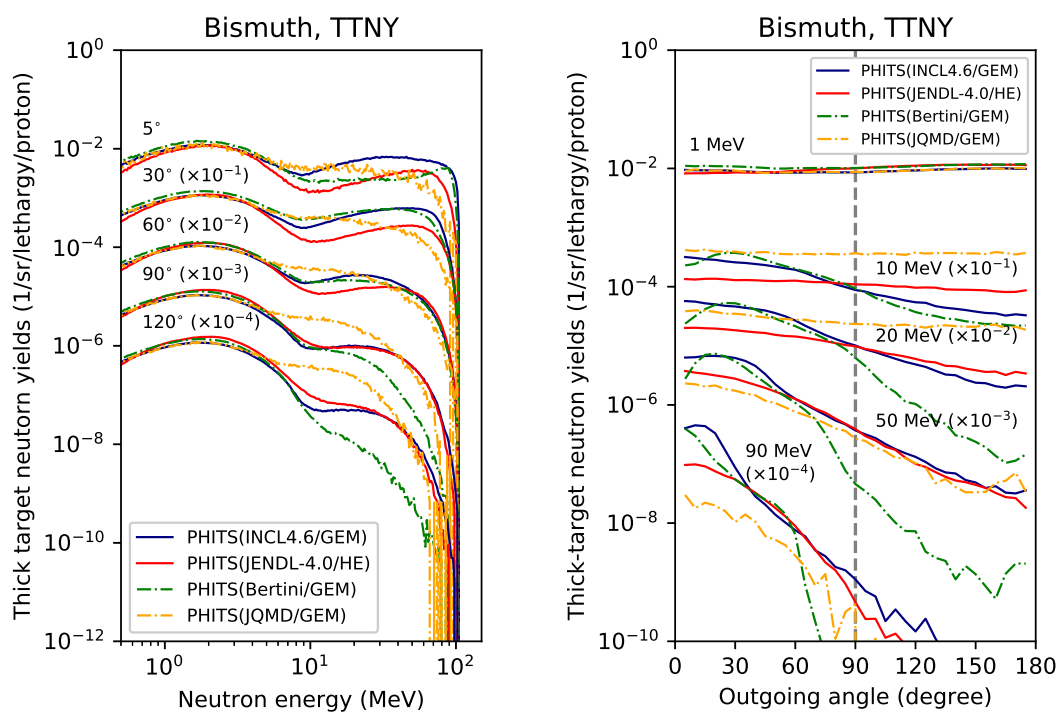


図 3-41 ビスマス標的に対する TTNY エネルギースペクトル (左) および TTNY 角度分布解析値 (右)

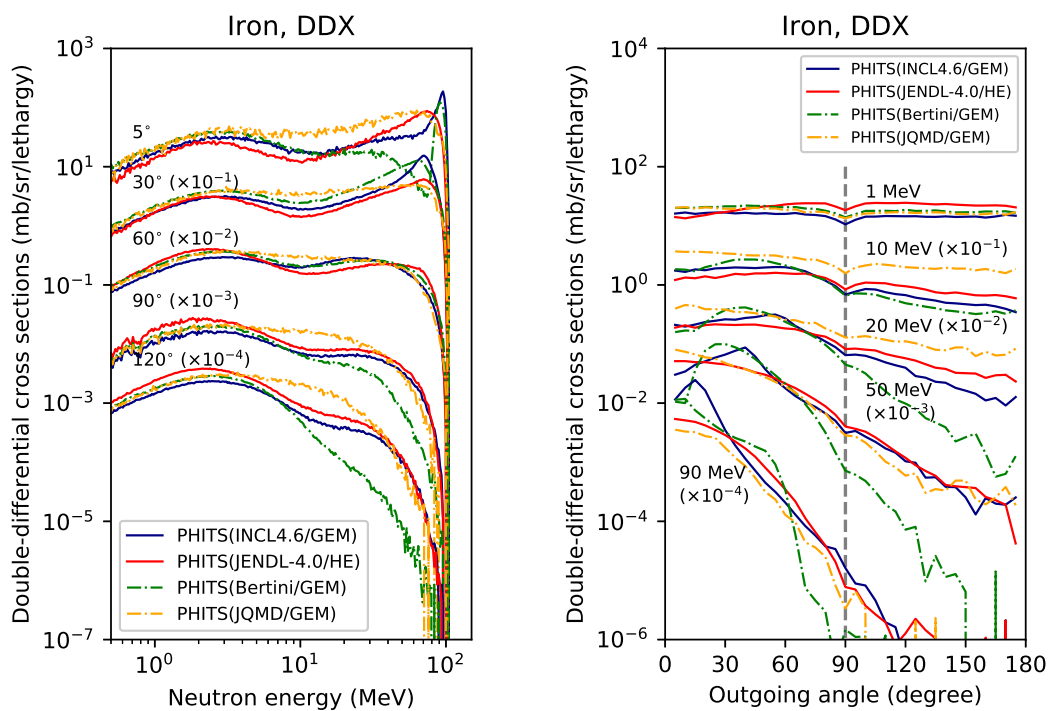


図 3-42 鉄標的に対する DDX エネルギースペクトル (左) および DDX 角度分布解析値 (右)

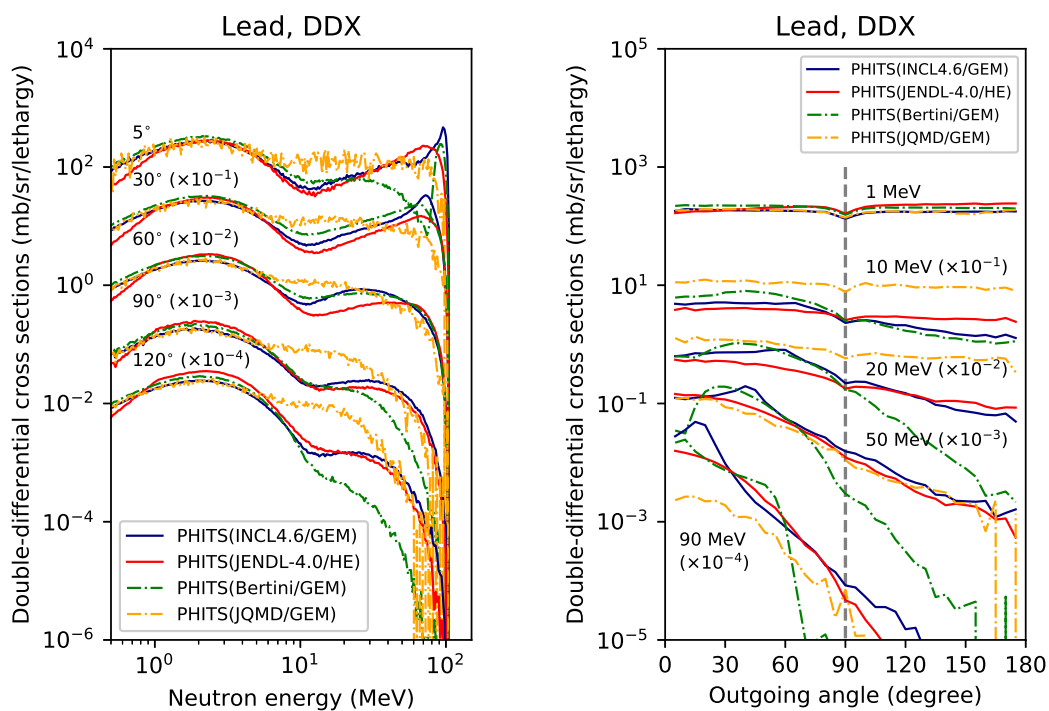


図 3-43 鉛標的に対する DDX エネルギースペクトル (左) および DDX 角度分布解析値 (右)

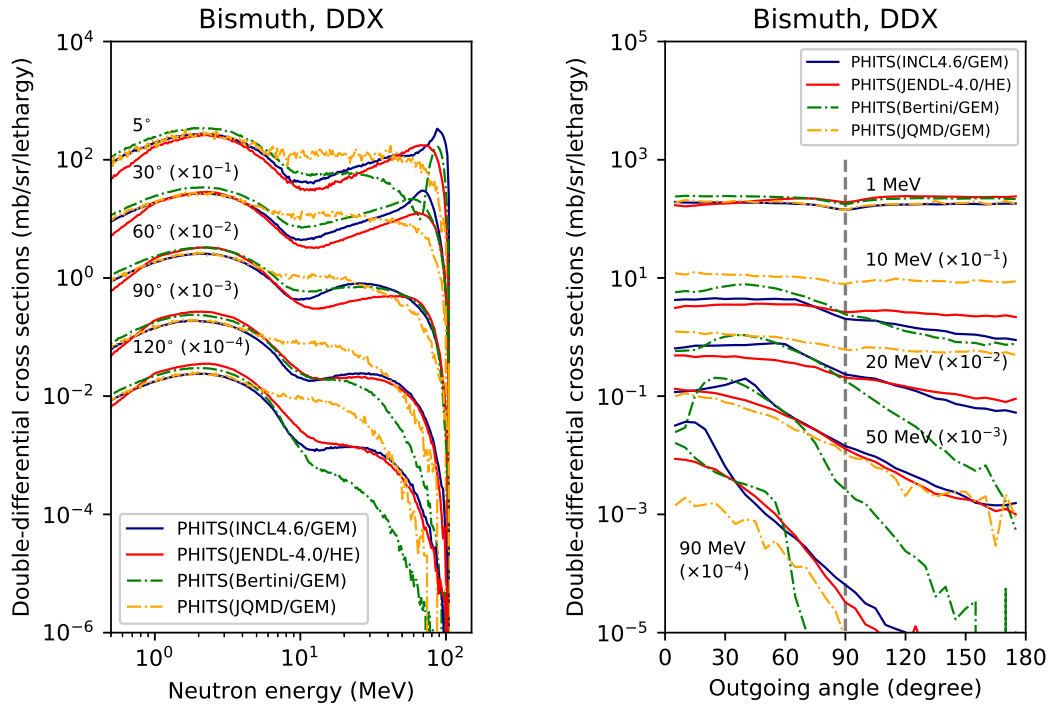


図 3-44 ビスマス標的に対する DDX エネルギースペクトル (左) および DDX 角度分布解析値 (右)

(7) TTNY 測定実験【R2-R4】

京大の FFAG 加速器施設において、令和 2 年度から令和 4 年度にかけて、鉄、鉛およびビスマス標的に対する TTNY 測定実験を実施した。図 3-45 に実験で使用した FFAG 加速器の外観を示す。この実験では、京大所有の既存の真空チェンバ (図 3-37) を使用し、その中に標的を設置した。図 3-46 に鉄標的の設置の様子を示す。標的の厚さは、標的中の陽子の飛程をもとにして決定した。飛程の計算には、飛程計算コード SRIM2013 [3.1-22] を使用し、107 MeV の陽子の飛程から余裕を持たせて 30 mm を採用した。標的の径は、陽子ビームが確実に標的に入射する大きさとなるように、余裕を持たせて直径 48 mm を採用した。陽子ビームプロファイルを評価するために、標的の直上に一辺が 100 mm の板状の蛍光体を設置した (図 3-46)。

図 3-47 に、真空チェンバ内に設置後の標的および蛍光体の外観を示す。この蛍光体に陽子ビームが入射すると、入射陽子に比例した強度の光を発する。この発光をプロファイルモニタを用いて撮影し、その強度分布を求めることで陽子ビームプロファイルが得られる。このようにして得られた陽子ビームのプロファイルを図 3-48 に示す。この測定により、ビームの広がりには FWHM で垂直方向 5.88 mm および水平方向 9.27 mm となり、陽子のほぼすべてが標的に入射することを確認した。ビームプロファイルの確認は、それぞれの測定角における TTNY 測定および DDX 測定を行うたびに、事前に実施した。

本測定では、陽子ビームエネルギーを 100 MeV と予定していたが、パルスの時間分解能およびビームロスに伴う中性子バックグラウンドを考慮すると、100 MeV 付近では 107 MeV が最適値

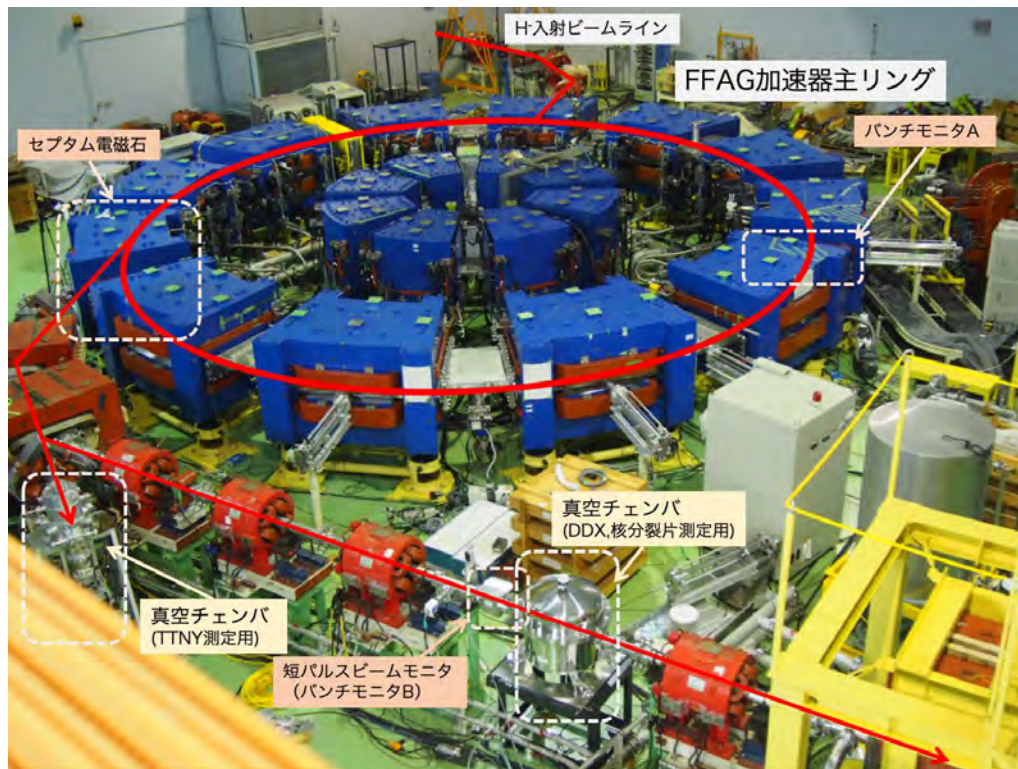


図 3-45 実験で使用した FFAG 加速器の外観



図 3-46 TTNY 測定用鉄標的の設置の様子

となった。そこで、本研究における陽子ビームのエネルギーは実験の観点から 107 MeV とした。TTNY 測定中は、ファラデーカップを用いて標的に流れる陽子の電流値を時系列で測定し、これと測定時間をもとに標的に入射する陽子の数を求めた。ビームの繰り返しは FFAG 加速器標準仕様の 30 Hz とし、3.1.2 節の短パルス化技術開発で短パルス化された幅 8 ns (1σ) の陽子ビームを用いた。パイルアップが生じないように、10 pA から 40 pA の範囲でビーム電流を調整しながら測定を行った。

図 3-49 に TTNY 測定実験における中性子検出器 (図 3-1) の配置を示し、図 3-50 に真空チェンバおよび標的周辺の構造を示す。さらに、図 3-51 に一例として鉛標的に対する TTNY 測定実

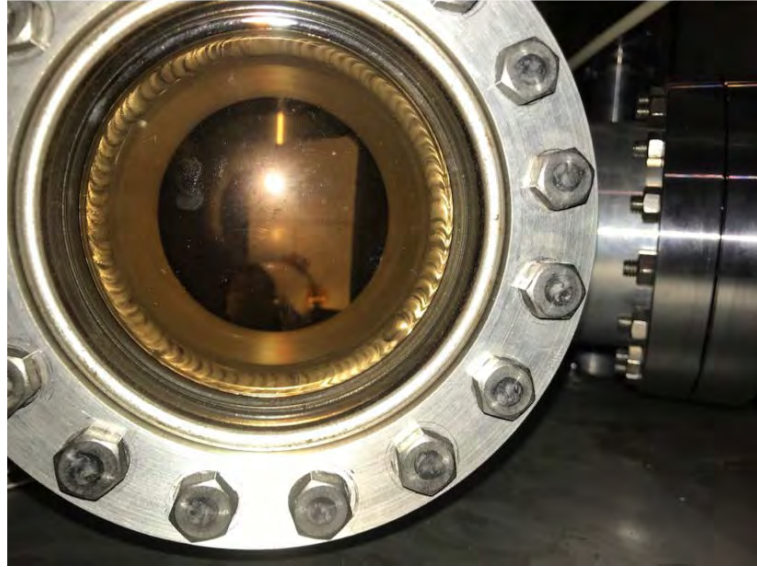


図 3-47 真空チェンバ内に設置された標的および蛍光体の外観

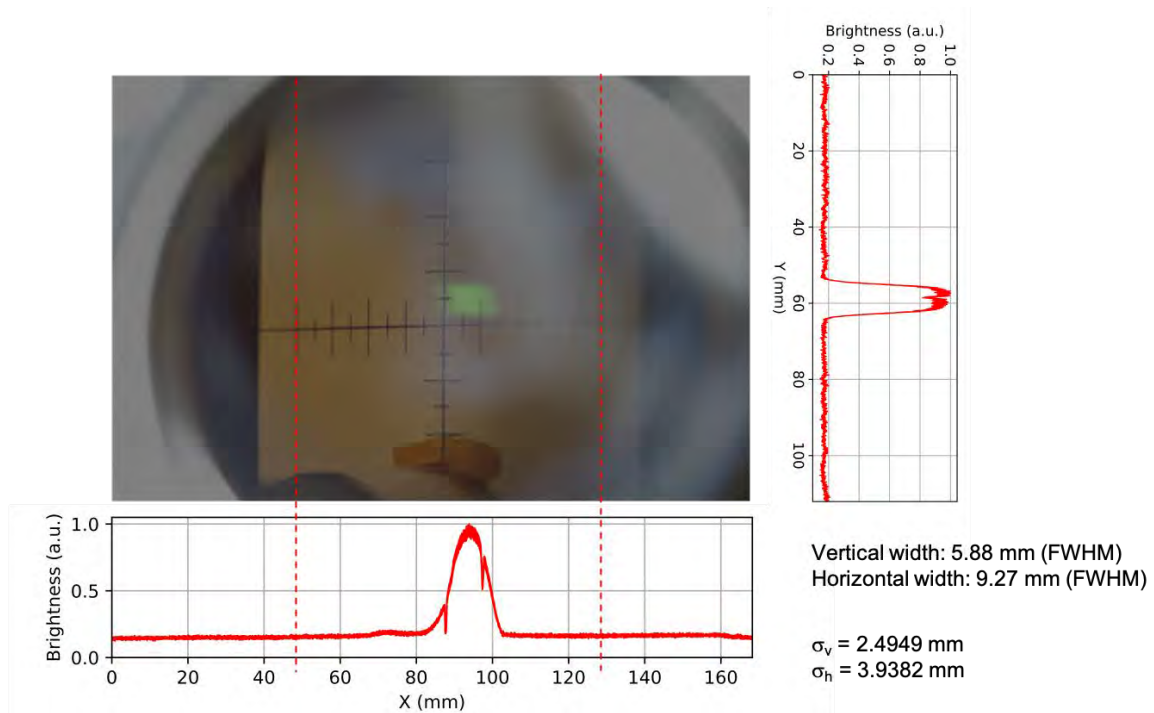


図 3-48 プロファイルモニタで測定された陽子ビームプロファイル

験における中性子検出器の配置の写真を示す。この実験では、鉛標的を中心にビーム入射軸周りで5°、60°、90°および120°に対して測定を行った。測定角および中性子の飛行距離（標的から中性子検出器までの距離）はレーザー墨出し器を用いて求めた。飛行距離が長いほどエネルギー分解能がよくなるため、中性子検出器は可能な限り標的から離して設置した。

令和2年度に実施した予備測定において、バックグラウンド中性子、統計量不足およびキッカー電磁石からの周期的な電磁波ノイズが問題となった。そこでその後の本測定では、それぞれの問題に対して以下に示す策を講じた。

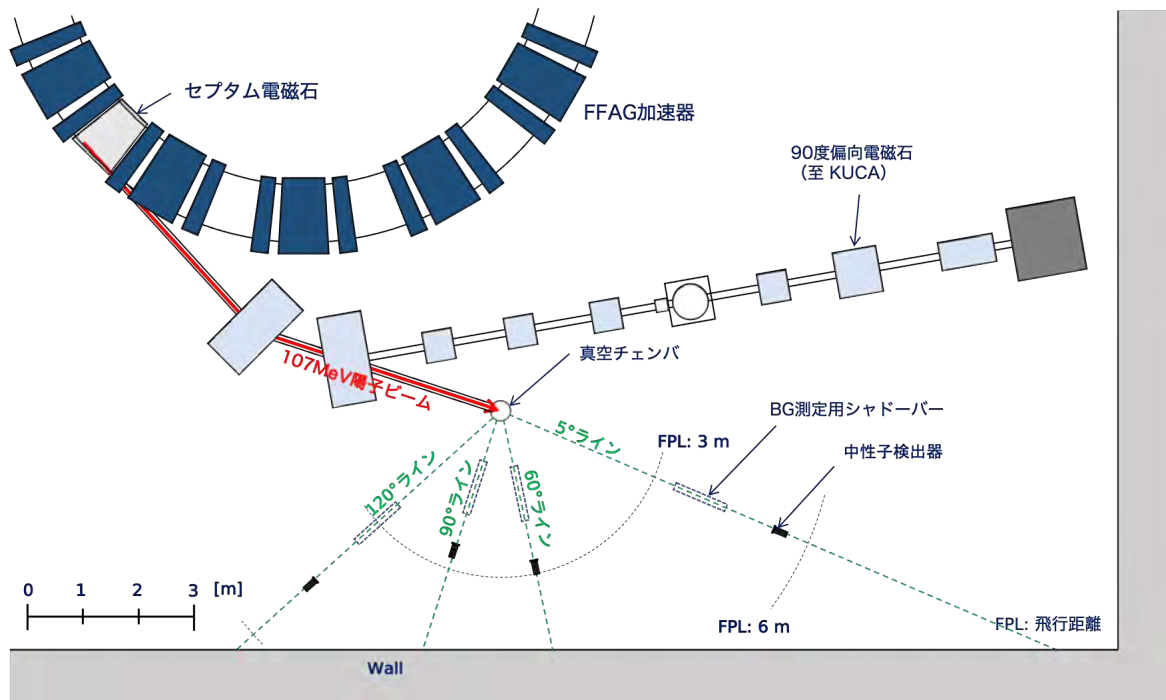


図 3-49 TTNY 測定における中性子検出器の配置

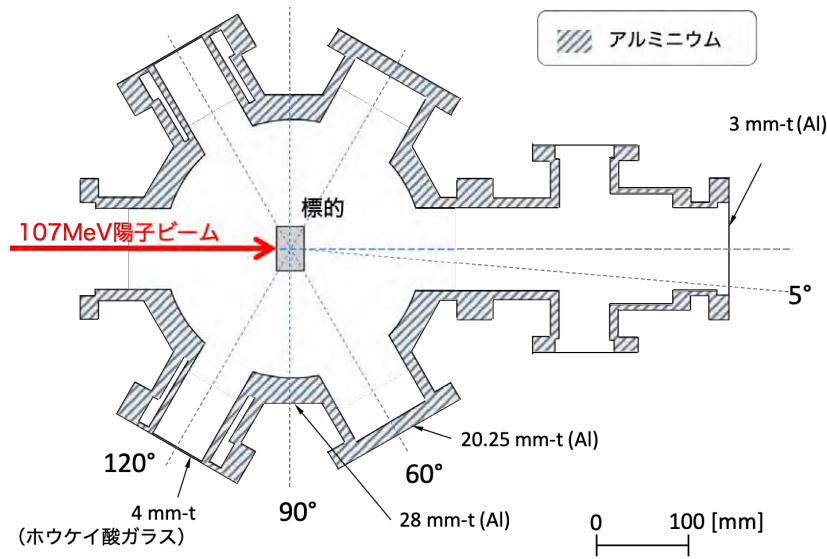


図 3-50 TTNY 測定における真空チェンバおよび標的周辺の構造

バックグラウンド中性子対策

鉄標的に対する予備測定で測定角 0° において中性子エネルギースペクトルを取得した結果、得られたエネルギースペクトルには、100 MeV をピークとする大量の高エネルギーバックグラウンド中性子が検出された (図 3-52)。TTNY のエネルギースペクトルを決定するには、フォアグラウンド測定で得られる中性子エネルギースペクトルからバックグラウンド測定で得られる中性子エネルギースペクトルを差し引く必要があるが、標的から放出する中性子に対してバックグラウンド中性子が極端に多い場合、正確な TTNY のエネルギースペクトルを得ることができない。

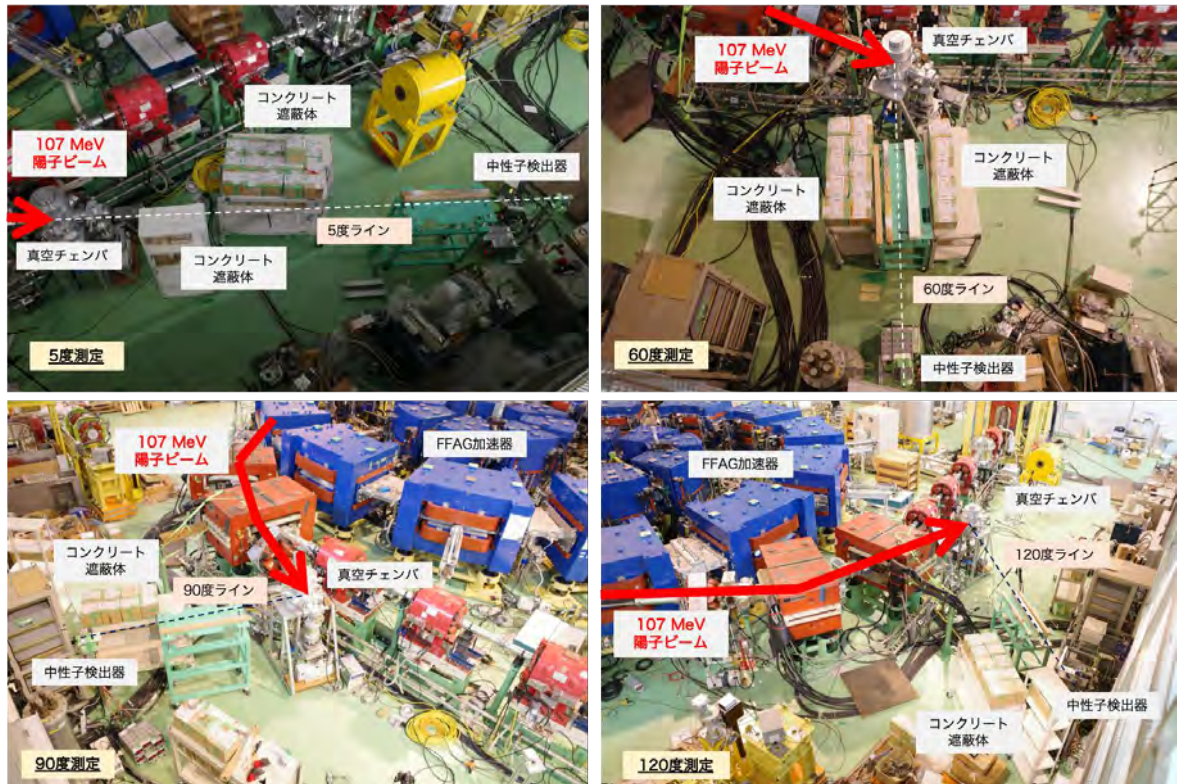


図 3-51 鉛標的 TINY 測定における中性子検出器の配置の写真

図 3-53 のバックグラウンド中性子のイメージが示すように、FFAG 加速器施設の図面を用いた検討の結果、この大量のバックグラウンド中性子は、陽子ビームの取り出しを行うセプタム電磁石の出射部でビーム軌道を外れた一部の陽子と周辺材料との核反応で生じることがわかった。このバックグラウンド中性子の影響を抑えるため、図 3-51 に示されるように、中性子検出器の周りにコンクリートブロック、鉄ブロック、ポリエチレンブロックなどの遮蔽体を置き、多くは中性子検出器とセプタム電磁石出射部の間の直線上に設置した。

統計量増強策

中性子検出器を 1 台用いて行った予備測定では、統計量が不足することがわかった (図 3-52)。陽子ビームの照射時間を伸ばすことの他に中性子検出器を標的に近づけて立体角を大きくすることで統計量を増やすことができるが、標的に近づけるとエネルギー分解能が悪化する。そこで、本測定では中性子の統計量を増やすため、飛行距離は可能な限り離れたうえで、中性子検出器を 8 台並べて中性子を検出し、それを合算するシステムを構築した (図 3-54)。

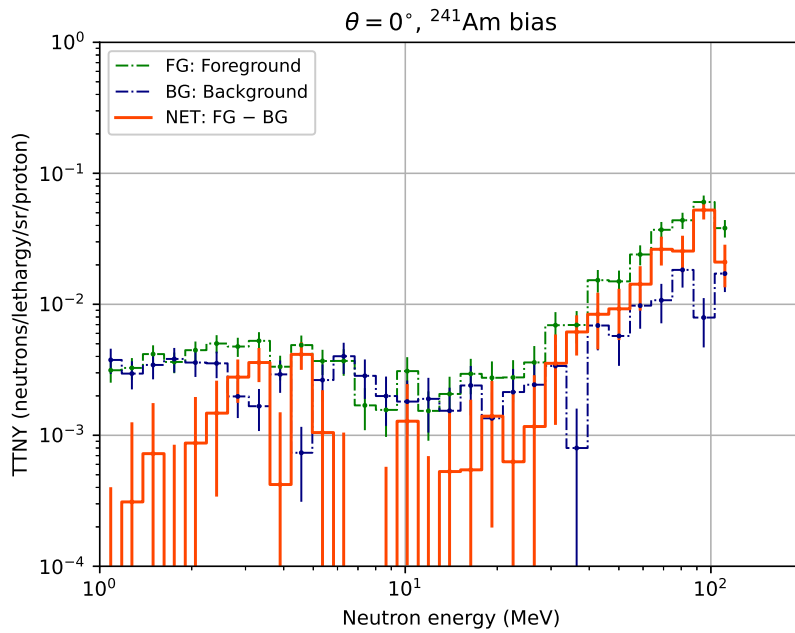


図 3-52 鉄標的に対する測定角 0° の中性子エネルギースペクトルの予備測定結果 (FG: フォアグラウンド測定結果、BG: バックグラウンド測定結果、NET: フォアグラウンド測定結果からバックグラウンド測定結果を差し引いたもの)

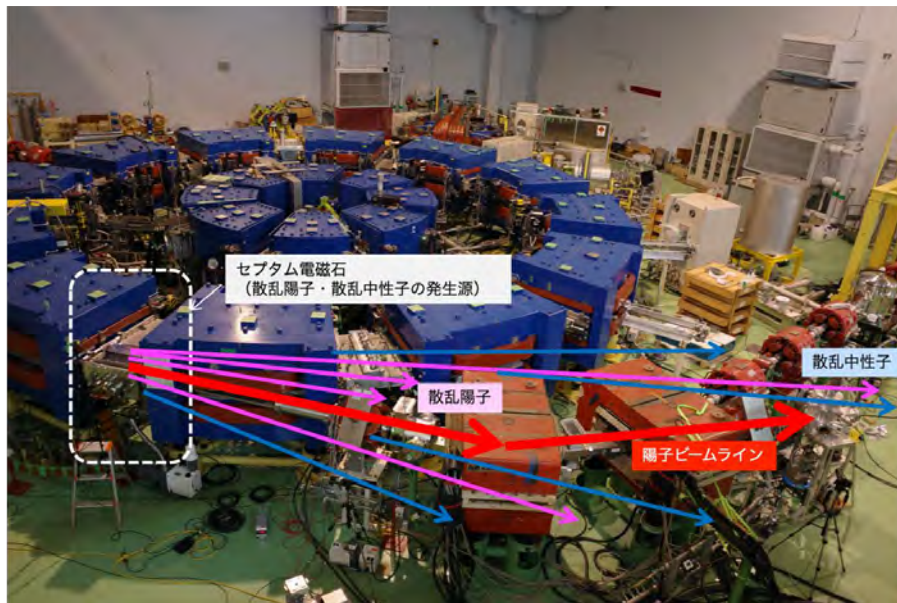


図 3-53 セプタム電磁石から発生する散乱陽子およびバックグラウンド中性子のイメージ

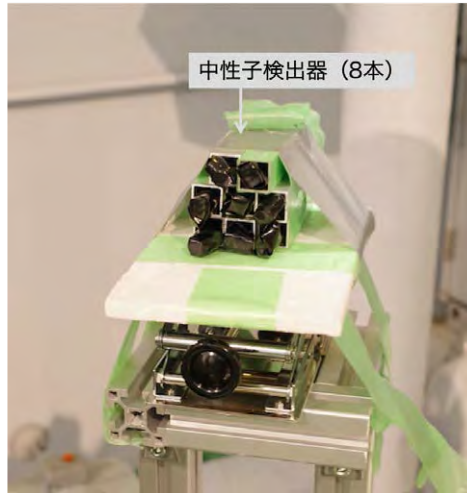


図 3-54 TTNY 測定および DDX 測定で用いた 8 台の中性子検出器

電磁波ノイズ対策

得られた TOF スペクトルに対して、図 3-55 に示すようなキッカー電磁石に起因するベースラインの揺らぎが観測され、これが検出される中性子とガンマ線のパルス波形弁別に影響することがわかった。この揺らぎは中性子検出器や測定ごとに異なり、各々の中性子検出器の測定結果に対してベースラインの補正を行う必要があることがわかった。そこで、TTNY 測定前後にキッカー電磁石の電磁波ノイズを測定することでベースラインを求め、TTNY 測定結果に対してベースラインの補正を行った。図 3-56 に、ベースライン測定で得られた波形と遅発成分補正量および全成分補正量の例を示す。

荷電粒子対策

この測定では、中性子やガンマ線以外にも、陽子ビームの一部が散乱した陽子や核反応で生成された陽子などの荷電粒子が中性子検出器に流入する可能性があったため、中性子検出器の検出面の前に厚さ 16 mm の銅ブロックを設置して、荷電粒子が中性子検出器に入り込むのを防止した(図 3-57)。

図 3-58 に測定回路の模式図を示す。実験後の解析でベースラインの補正を行うため、キッカー電磁石に起因するノイズ信号(電磁波信号)も双極子アンテナを用いて測定した。

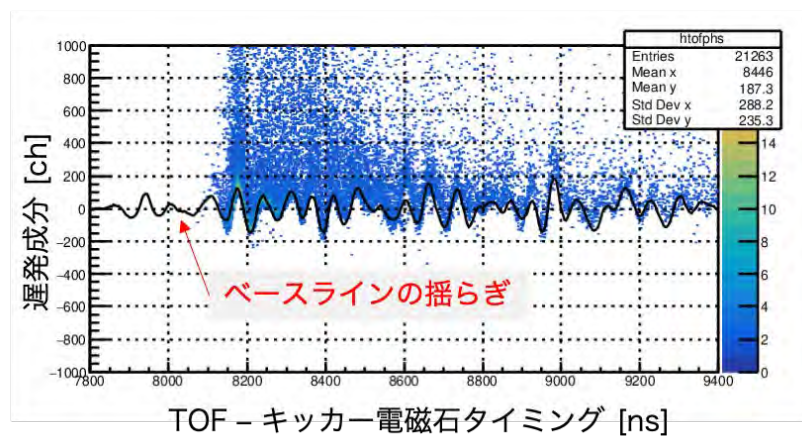
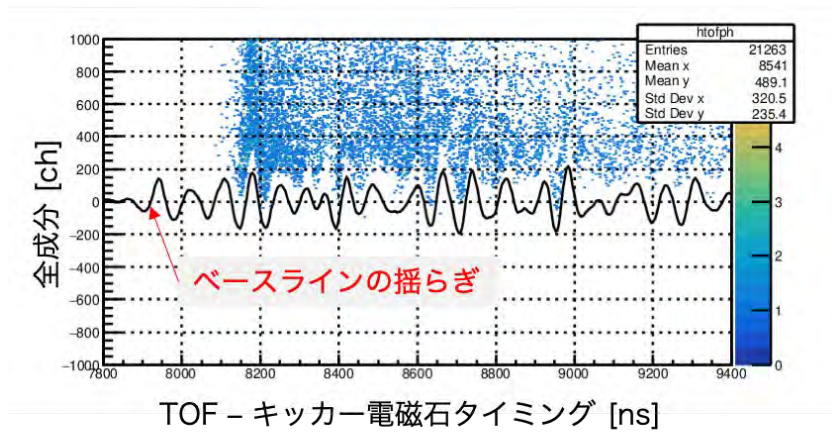


図 3-55 キッカー電磁石に起因するベースラインの揺らぎ（上のパネル：TOF からキッカー電磁石タイミングを差し引いた時間（ns）対 全発光成分（ch）、下のパネル：TOF からキッカー電磁石タイミングを差し引いた時間（ns）対 遅発発光成分（ch）、通常、ベースラインは電磁波ノイズがない環境では時間に依存せず 0 ch となる）

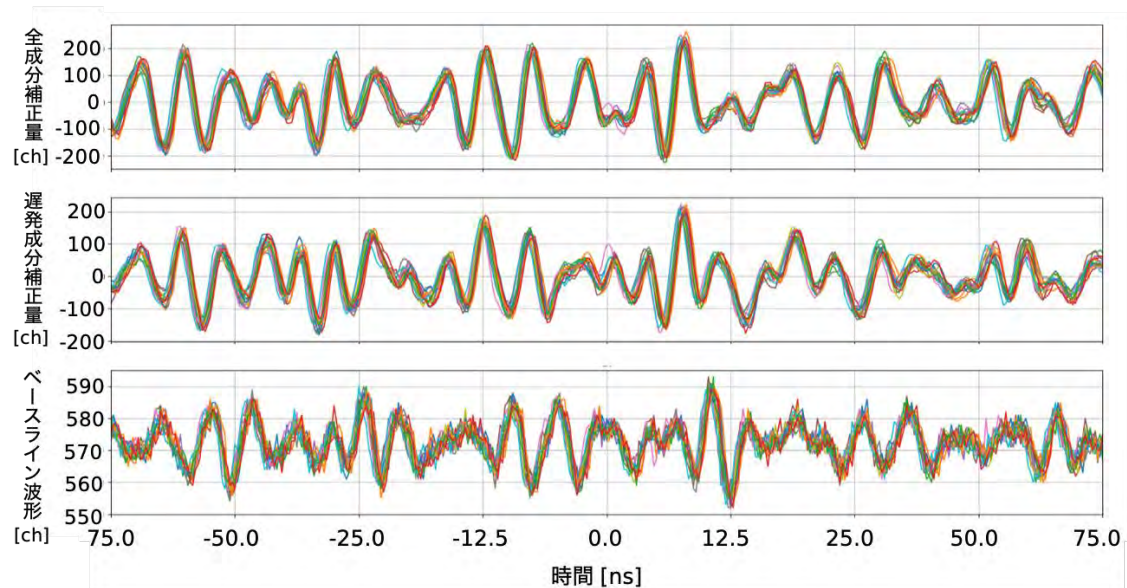


図 3-56 ベースライン測定で得られたベースラインの波形と遅発成分補正量および全成分補正量の例（下のパネル：ベースライン波形、中央のパネル：ベースライン波形をもとに得られた遅発成分補正量、上のパネル：ベースライン波形をもとに得られた全成分補正量）

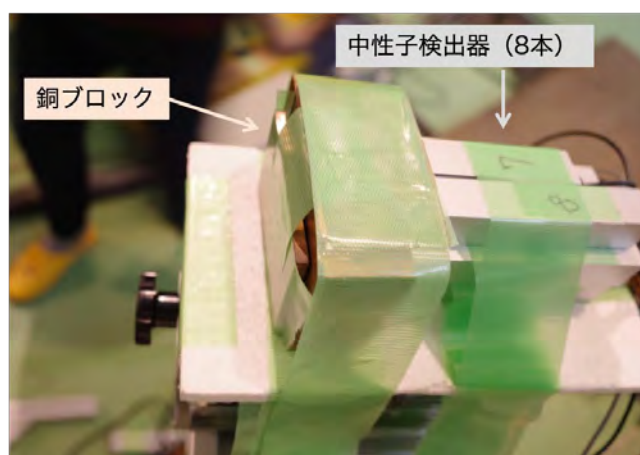


図 3-57 8台の中性子検出器の前に置かれた銅ブロック

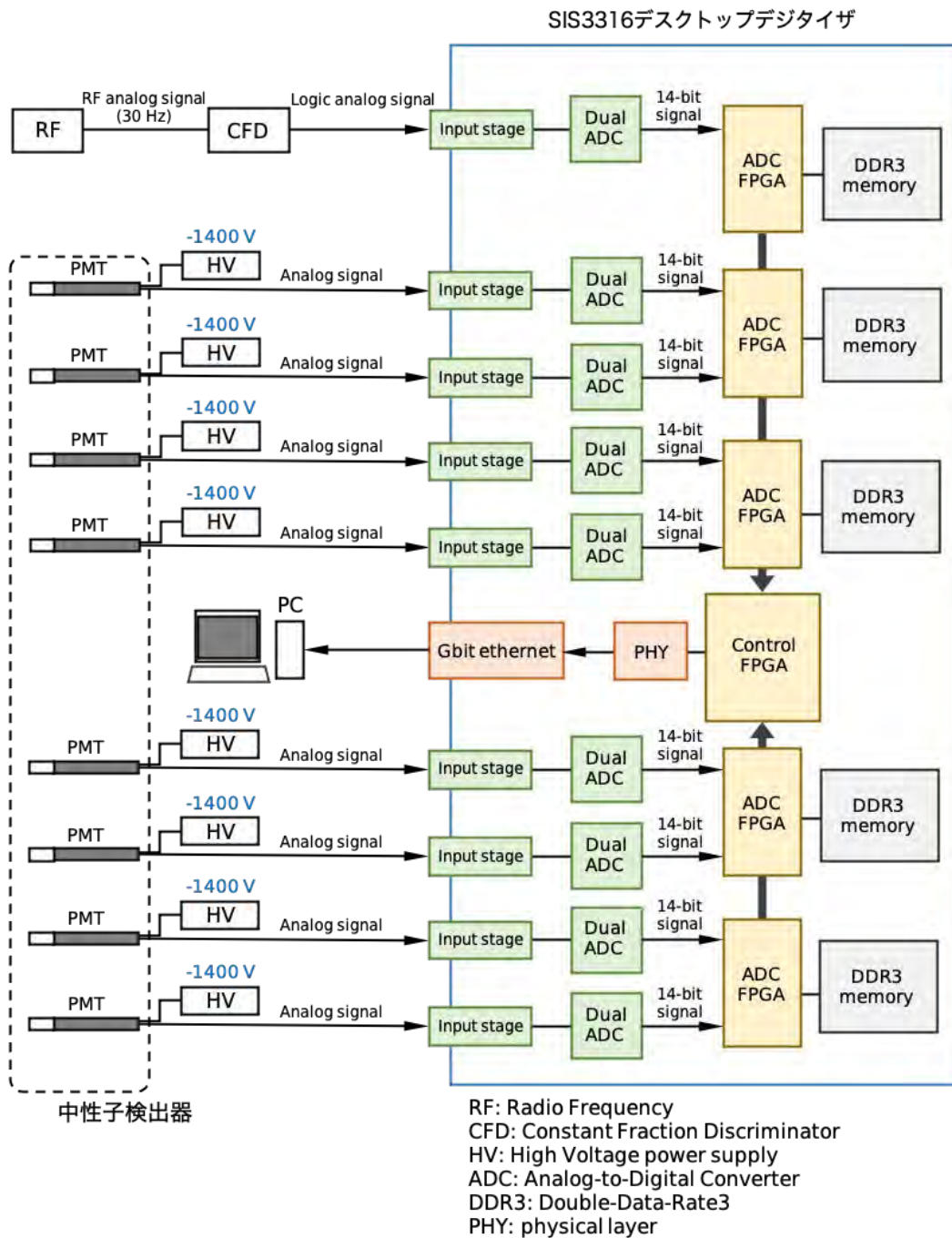


図 3-58 TTN Y 測定実験の測定回路の模式図

(8) DDX 測定実験【R3-R4】

令和3年度から令和4年度に、DDX 測定実験を行った。この実験では、本研究で新たに開発した真空チェンバ（図3-34および図3-45）を使用し、その中のビームライン上に薄い標的を設置した。標的試料の厚さは可能な限り薄い方が望ましいが、検出できる中性子収量の統計量を増やす観点から、鉛標的に対して2 mm、ビスマス標的に対して5 mmを採用した。検出角は30°、60°、90°、120°および150°とした。測定では、ターゲットホルダに鉛標的、ビスマス標的、ビームモニタおよびファラデーカップを設置し、これらのビーム照射位置への移動は図3-59に示すステッピングモータを用いた遠隔操作により行った。図3-60に、DDX 測定における中性子検出器の配置を示し、図3-61に、真空チェンバおよび標的が設置されたターゲットホルダの構造を示す。



図3-59 ステッピングモータの外観（ボタンを押すと該当の番号の標的等がビーム照射位置に移動する）

TTNY 測定と同様に統計量増強策および電磁波ノイズ対策を講じた。DDX 測定ではセプタム電磁石からの散乱陽子に起因するバックグラウンド中性子の他に、下流に設置されたビームダンブ、ビーム窓および偏向電磁石などの周辺機器に標的を貫通した陽子が当たり、そこからバックグラウンド中性子が放出される。そこでここでは、バックグラウンド中性子対策として図3-62に示すように中性子検出器と下流側周辺機器との間にも遮蔽体を設置した。

検出角60°、90°、120°および150°におけるDDX 測定では、荷電粒子対策としてVETO 検出器を中性子検出器の前に設置し、データ解析において荷電粒子の事象を除去した（図3-64）。このVETO 検出器は、標的から8台の中性子検出器が隠れるのに十分な大きさで板状（縦100 mm × 横100 mm × 厚さ2 mm）のライトガイド付きプラスチックシンチレータ（応用光研社製、型番EJ-212）と直径2インチの光電子増倍管（浜松ホトニクス社製、型番H2431）を光学用グリスで光学的に接続したものである。図3-63にライトガイド付きプラスチックシンチレータの設計図面を示し、DDX 測定で用いたVETO 検出器の外観を図3-64に示す。検出角30°では、散乱陽子に起因すると思われるパイルアップが生じたため、TTNY 測定と同様に厚さ16 mmの銅ブロックを設置して測定した。

図3-45の主リングに取り付けられたバンチモニタAおよび標的の上流に設置されたバンチモニタBの2つの静電型バンチモニタを用いてビーム電流を測定し、これと測定時間から標的に照

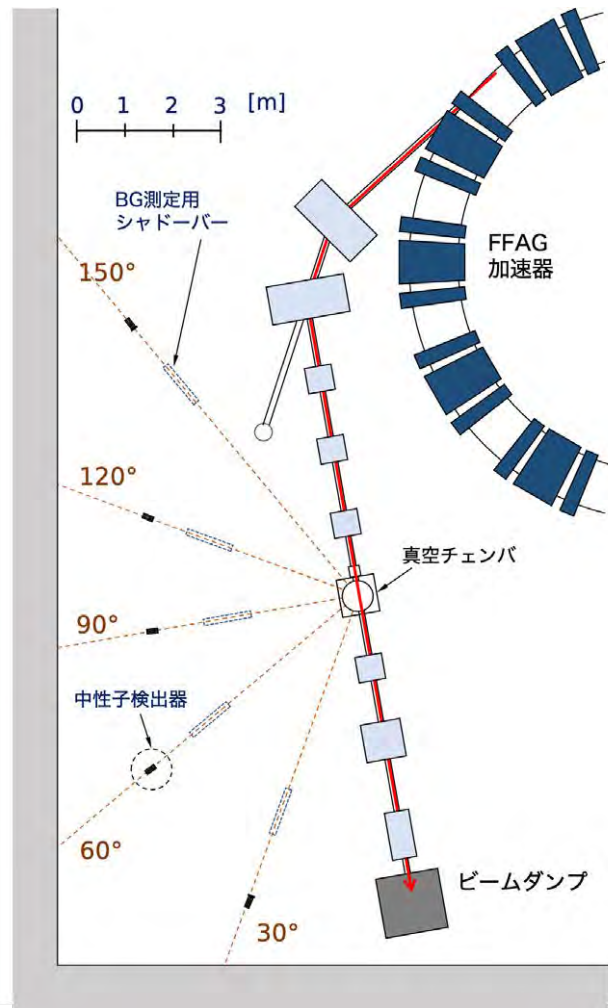


図 3-60 DDX 測定における中性子検出器の配置

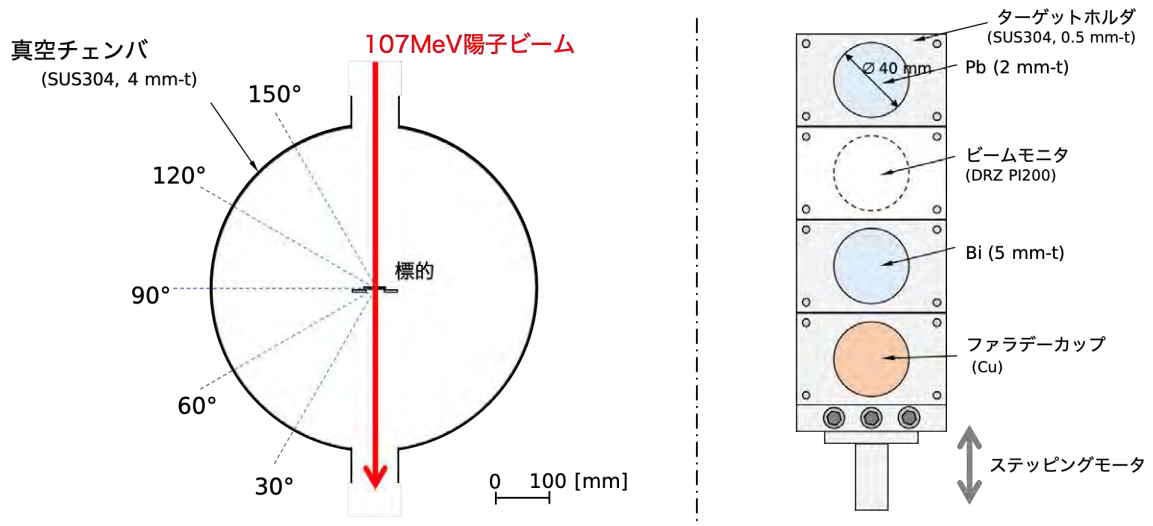


図 3-61 DDX 測定における真空チェンバおよび標的が設置されたターゲットホルダの構造

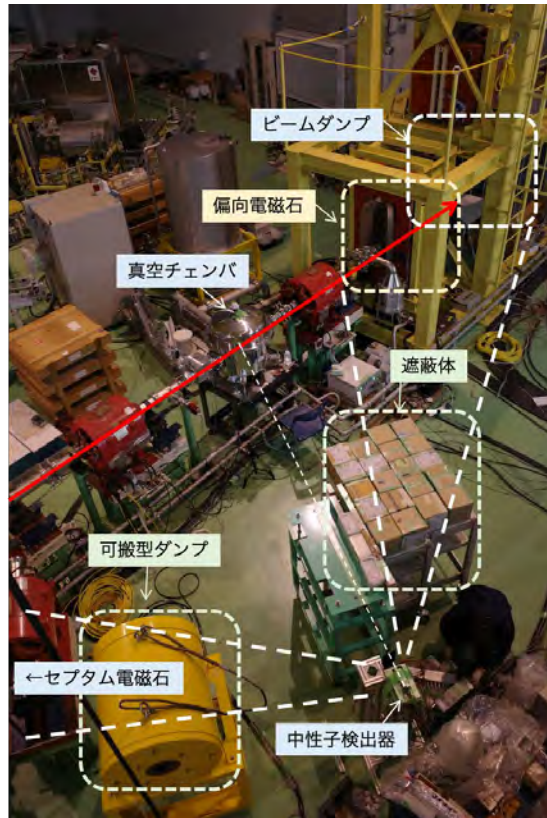


図 3-62 DDX 測定実験における遮蔽体の配置 (鉛標的、120° 測定)

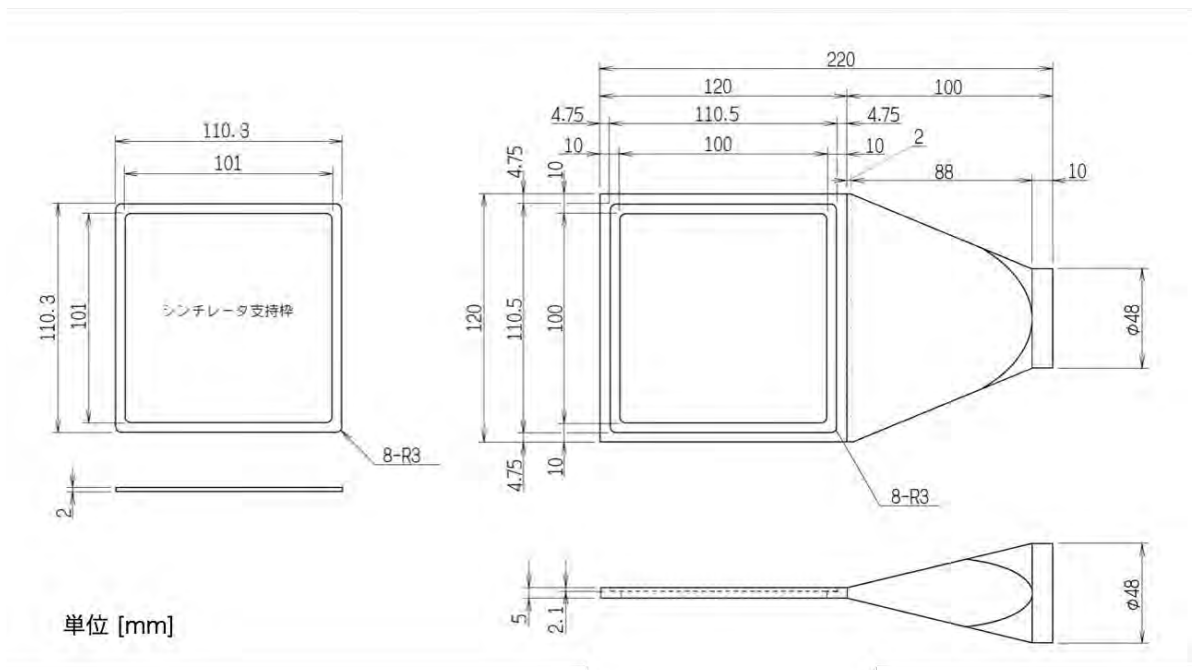


図 3-63 ライトガイド付きプラスチックシンチレータの設計図面 (ライトガイドおよびシンチレータは、反射材と遮光効果を持つ素材テープで覆う)



図 3-64 8 台の中性子検出器の前に置かれた VETO 検出器

射される陽子の数を求めた。DDX 測定における各測定点の飛行距離、立体角および測定時間を表 3-8 に示す。パイルアップを防ぐため、20 pA から 45 pA の範囲でビーム電流を調整しながら測定を行った。図 3-65 に DDX 測定で用いた測定回路の模式図を示す。

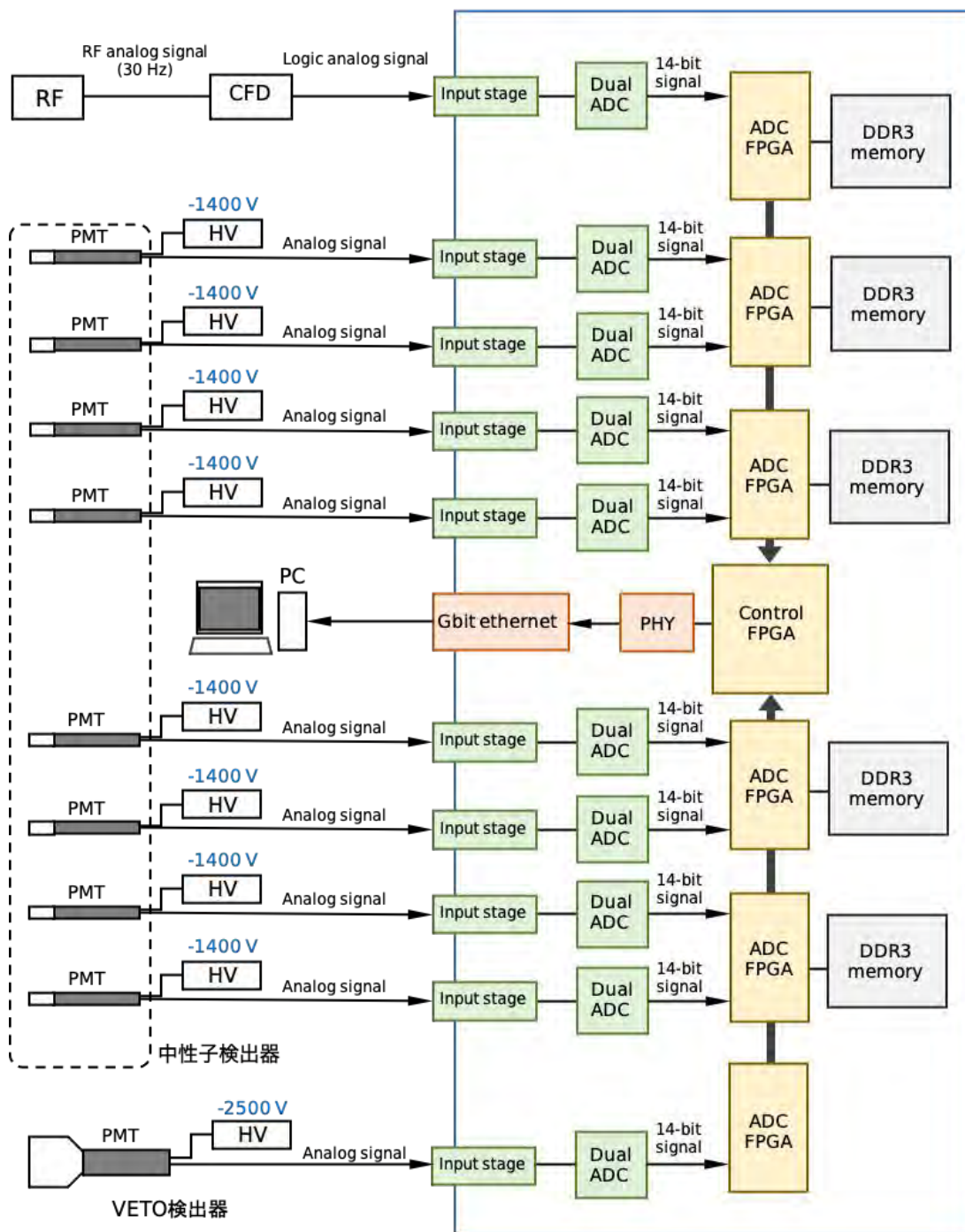
表 3-8 DDX 測定における各測定点の飛行距離、立体角および測定時間

| | 飛行距離 L (m) | 立体角 $\Delta\Omega$ (msr) | フォアグラウンド測定 (s) | バックグラウンド測定 (s) |
|----------|-----------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| 鉛標的 | | | | |
| 測定角 30° | 7.24 | 0.0077 | 12,499 | 7,441 |
| 測定角 60° | 6.28 | 0.0102 | 3,625 | 3,626 |
| 測定角 90° | 3.93 | 0.0260 | 5,753 | 5,121 |
| 測定角 120° | 4.89 | 0.0168 | 3,823 | 4,022 |
| 測定角 150° | 5.73 | 0.0122 | 4,393 | 4,361 |
| ビスマス標的 | | | | |
| 測定角 30° | 7.24 | 0.0077 | 8,883 | 6,100 |
| 測定角 60° | 6.28 | 0.0102 | 3,313 | 3,271 |
| 測定角 90° | 3.93 | 0.0260 | 4,000 | 3,721 |
| 測定角 120° | 4.89 | 0.0168 | 5,545 | 6,243 |
| 測定角 150° | 5.73 | 0.0122 | 3,311 | 1,587 |

* 令和 3 年度に測定角 60°、90° および 150° に対する測定を実施

† 令和 4 年度に測定角 30° および 150° に対する追加測定を実施

SIS3316デスクトップデジタイザ



RF: Radio Frequency
 CFD: Constant Fraction Discriminator
 HV: High Voltage power supply
 ADC: Analog-to-Digital Converter
 DDR3: Double-Data-Rate3
 PHY: physical layer

図 3-65 DDX 測定実験の測定回路の模式図

(9) データ解析【R2-R4】

測定後、以下の要領でデータ解析を行い、鉄標的、鉛標的およびビスマス標的に対する DDX および TTNY を決定した。この解析は令和 2 年度から令和 4 年度の期間を通じて実施した。

ガンマ線検出事象の除去

測定で得られた波高情報からベースライン補正を行った後、中性子とガンマ線の波形の違いを利用して、中性子検出器で検出されたガンマ線の検出事象を除去する。図 3-66 に、一例として鉛標的に対する測定角 5° に対する TTNY 測定で得られたパルス波形弁別の二次元プロットを示す。ガンマ線によるシンチレータの発光は中性子によるものよりも速く減衰するという特性により、ガンマ線によるシンチレータの全発光成分に対する遅発発光成分の比は、中性子によるものよりも小さくなる。そのため、ガンマ線の検出事象は図中の下側に帯状に現れ、図中の赤線を境界にして中性子の検出事象とガンマ線の検出事象の弁別が可能となる。解析では、この図の赤線より上側の中性子事象および ^{241}Am バイアスまたは ^{137}Cs バイアス以上の中性子検出事象のみを数える。

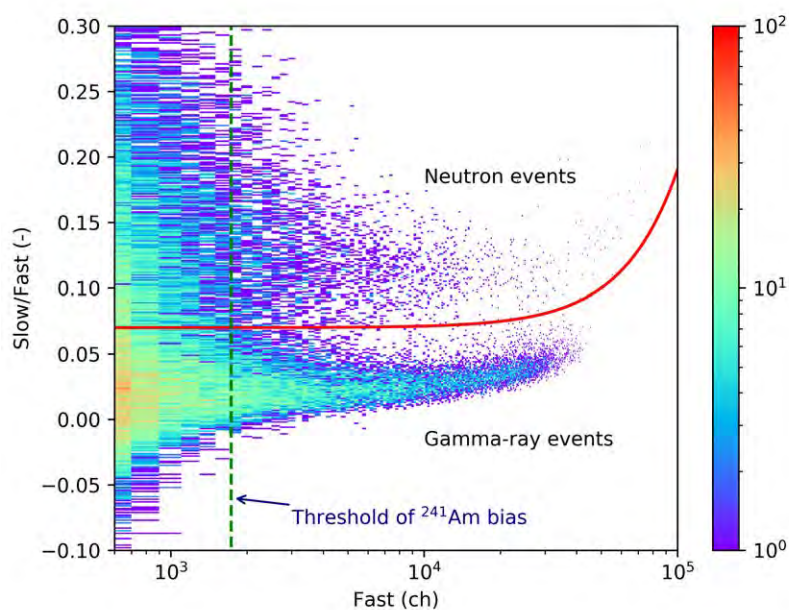


図 3-66 鉄標的に対する測定角 5° の TTNY 測定におけるパルス波形弁別の二次元プロット (Fast は全発光成分を表し、Slow は遅発発光成分を表す)

飛行時間スペクトルの導出

SIS3316 で測定したパイルアップ率を考慮して数えた中性子の飛行時間 (TOF) スペクトルを求め、フォアグラウンド測定で得られた TOF スペクトルからバックグラウンド測定で得られたスペクトルを差し引くことで目的とする中性子の TOF スペクトルを得る。図 3-67 に、一例として鉛標的の測定角 5° に対する TTNY 測定の TOF スペクトルを示す。この図より、フォアグラウン

ド測定結果とバックグラウンド測定結果に明確な差が現れ、これらを差し引くことでバックグラウンド中性子成分が除去されていることがわかる。

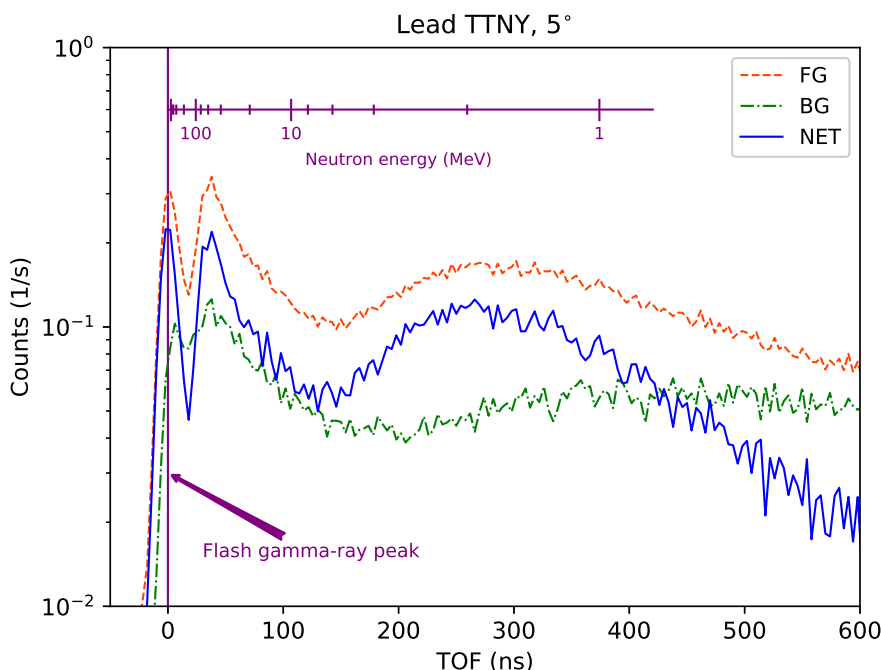


図 3-67 鉛標的の測定角 5° に対する TTNY 測定 の TOF スペクトル (FG: フォアグラウンド測定結果、BG: バックグラウンド測定結果、NET: フォアグラウンド測定結果からバックグラウンド測定結果を差し引いたもの、左端のピークは即発ガンマ線の検出事象、左から 2 番目のピークは準弾性散乱の検出事象、中央のなだらかなピークは蒸発中性子の検出事象を表す。中性子エネルギーと TOF の関係を紫色の軸で記している)

中性子エネルギースペクトルの導出

式 (3.4)、式 (3.5) および式 (3.6) に示す相対論的運動学の式により、中性子の TOF スペクトルからエネルギースペクトルに換算する。ここで、図 3-67 で示した繰り返し 30 Hz の即発ガンマ線を TOF のスタート信号とした。相対論的運動学によれば、中性子の運動エネルギーは以下の式で与えられる。

$$E_n = (\gamma - 1) m_n c^2 \quad (3.4)$$

ここで、 m_n は中性子の静止質量 (= 939.565 MeV)、 c は光速 (= 2.99792458×10^8 m/s)、 γ はローレンツ因子であり、光速比 β を用いて次のように表される。

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (3.5)$$

ここで β は飛行距離 L と、中性子と即発ガンマ線の飛行時間差 Δt を用いて次式で表される。

$$\beta = \frac{L}{L + c\Delta t} \quad (3.6)$$

エネルギー分解能は以下の式より求める。

$$\frac{\delta E_n}{E_n} = \gamma(\gamma + 1) \sqrt{\left(\frac{\delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2} \quad (3.7)$$

ここで、 δE_n はエネルギー分解能、 δt は時間分解能、 δL は飛行距離 L に対する不確かさを表す。時間分解能 δt は即発ガンマ線のパルス幅 10 ns (図 3-67 の左端のピークの 1σ) および SIS3316 の時間ビンの最小幅 4 ns (= 1 ch) をまとめて 12 ns とした。8 台の中性子検出器位置の中性子の発生点のばらつきから、飛行距離の不確かさ δL は数 mm から 1 cm 程度と考えられるが、エネルギー分解能に対する δL の影響は δt に比べて無視できることを確認した。図 3-68 に、鉛標的に対する各測定位置でのエネルギー分解能 (1σ) を示す。

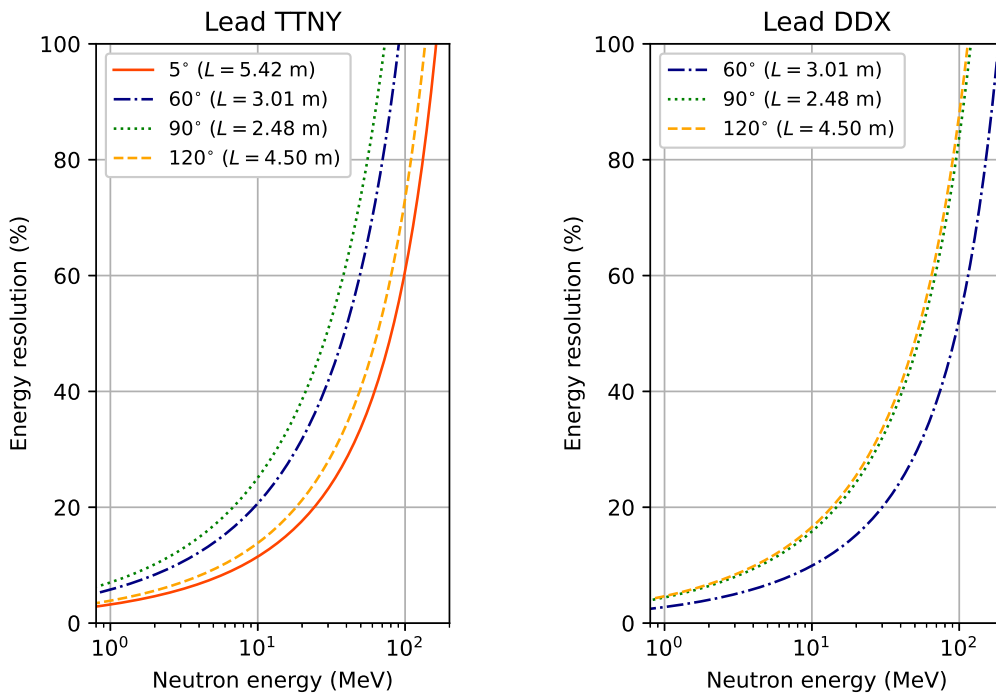


図 3-68 鉛標的に対する TTNY 測定および DDX 測定における各測定位置でのエネルギー分解能 (1σ 、左 : TTNY 測定、右 : DDX 測定)

DDX および TTNY の導出

TTNY および DDX は以下の式より導出する。

- TTNY

$$\frac{d^2 Y_n}{du d\Omega} = \frac{N_n(E_n, \theta)}{\Delta u \Delta \Omega} \frac{1}{N_p \epsilon(E_n) \eta(E_n)} \quad (3.8)$$

- DDX

$$\frac{d^2 \sigma}{du d\Omega} = \frac{N_n(E_n, \theta)}{\Delta u \Delta \Omega} \frac{1}{N_p N_t \epsilon(E_n) \eta(E_n)} \quad (3.9)$$

ここで、 $N_n/\Delta u\Delta\Omega$ は、立体角 $\Delta\Omega$ の中性子検出器で、レサジー幅 Δu のエネルギービンに検出された中性子の数を表す。 N_p は入射陽子数を表し、測定中に得られたビーム電流値と測定時間から求められる。 N_t は標的の面密度を表し、標的の数密度と寸法から求められる。 η は放出中性子が中性子検出器に到達するまでの透過率を表し、 ϵ は中性子検出効率を表す。

図 3-69 に、PHITS による解析で得られた、鉛標的に対する各測定位置での放出中性子の標的から中性子検出器に到達するまでの中性子の透過率を中性子エネルギーの関数として示す。ここで TTNY 測定では、真空チェンバの壁と中性子検出器の前に置いた厚さ 16 mm の銅ブロックおよび真空チェンバ壁面から中性子検出器までの空気（大気圧）を中性子が透過する。チェンバ壁の透過計算では、それぞれの角度に対して図 3-50 に示した材質と壁厚を考慮した。DDX 測定では、厚さ 4 mm のステンレス製の真空チェンバの壁、厚さ 2 mm の VETO 検出器および真空チェンバ壁面から中性子検出器までの空気（大気圧）を透過する。測定で使用した中性子検出器の中性子検出効率は、図 3-8 の PHITS の SCINFUL モードによる解析結果を用いた。中性子エネルギースペクトルの導出では、中性子エネルギーが 20 MeV 未満に対しては ^{241}Am バイアスを使用し、20 MeV 以上に対しては ^{137}Cs バイアスを使用した。

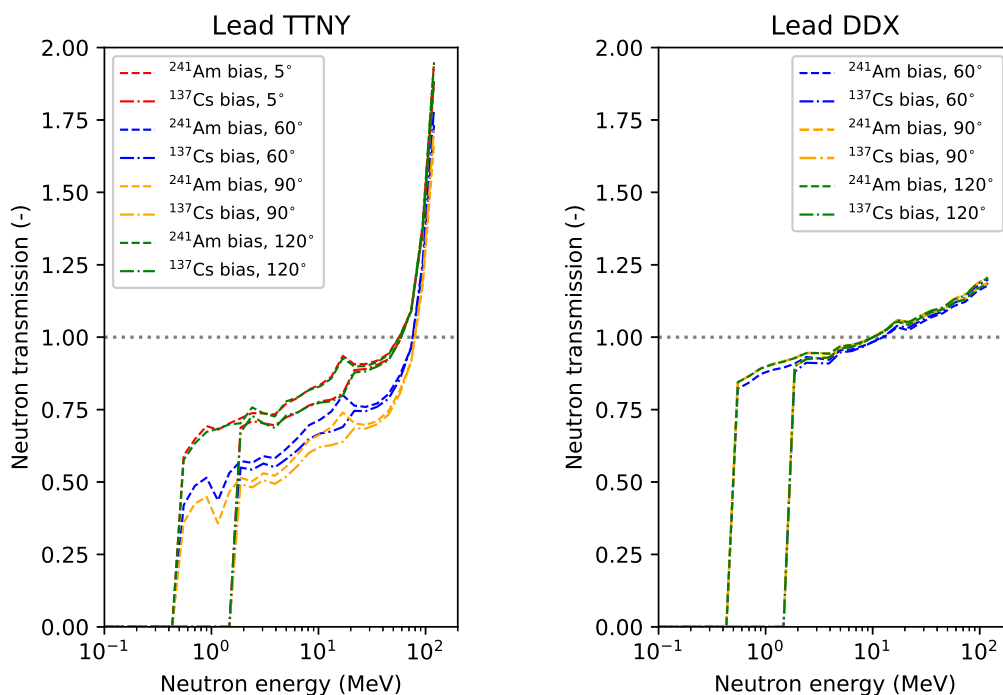


図 3-69 鉛標的に対する TTNY 測定および DDX 測定における各測定位置での放出中性子の標的から中性子検出器に到達するまでの中性子の透過率（左：TTNY 測定、右：DDX 測定）

(10) 理論モデルとの比較および課題抽出【R4】

TTNY

図 3-70、図 3-71 および図 3-72 に TTNY の実験結果と 4 種類の理論モデル（核反応モデル）（INCL4.6/GEM、Bertini/GEM、JQMD/GEM および JQMD/SMM/GEM）および評価済み核

データライブラリ JENDL-4.0/HE による解析結果の比較を示す。ここで、縦軸は統計的な 1σ の不確かさを表し、エネルギースペクトル測定値の横軸の誤差棒は 1σ のエネルギー分解能を表す。実験結果と核反応モデルによる解析結果との比較により、核反応モデルの再現性には以下のような傾向があることがわかった。

- どのモデルも最前方角 (5°) のピークを再現しない。この不一致は鉄標的で顕著である。
- INCL4.6/GEM は、 5° および 60° で過大評価およびピーク位置の不一致が見られる。
- JQMD/GEM は、すべての角度に対して 10 MeV から 30 MeV の領域の核内カスケード成分を過大評価する。さらに、前方角の準弾性散乱成分を過小評価する。
- JQMD/SMM/GEM は、JQMD/GEM のような 10 MeV から 30 MeV の過大評価は見られないが、10 MeV 以下で過大評価が見られる。
- Bertini/GEM は、後方角 (90° および 120°) の核内カスケード成分を大幅に過小評価する。
- JENDL-4.0/HE による後方角の核内カスケード成分の再現性は比較的良好であるが、蒸発成分は過大評価傾向である。

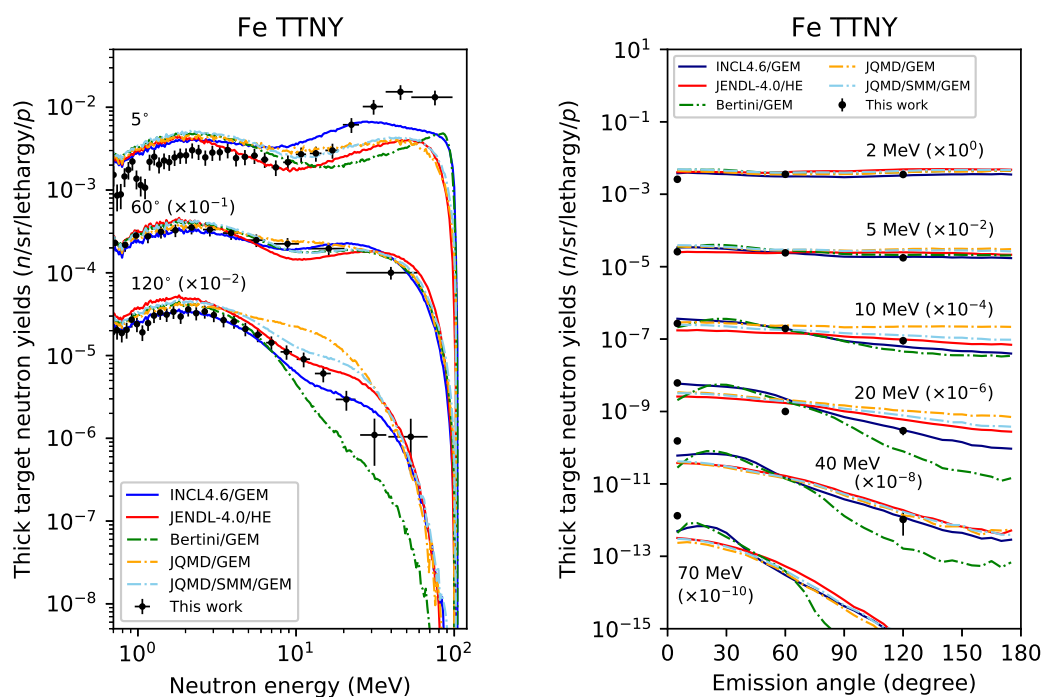


図 3-70 鉄標的に対する TTNY の実験結果と核反応モデルによる解析結果の比較 (左: エネルギー分布、右: 角度分布)

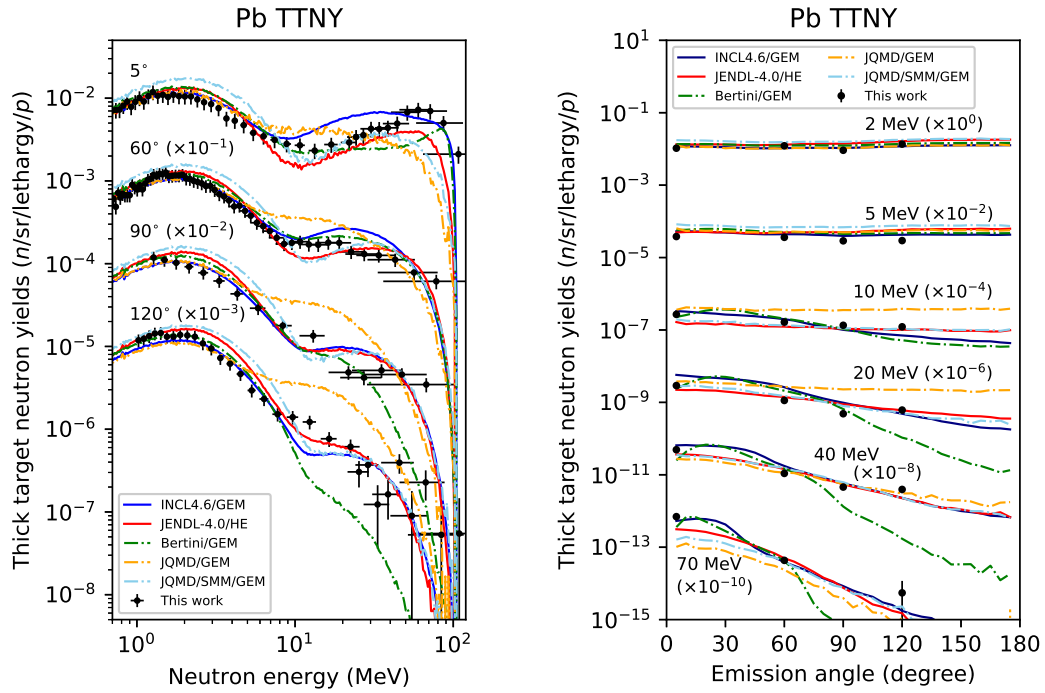


図 3-71 鉛標的に対する TTNY の実験結果と核反応モデルによる解析結果の比較 (左: エネルギー分布、右: 角度分布)

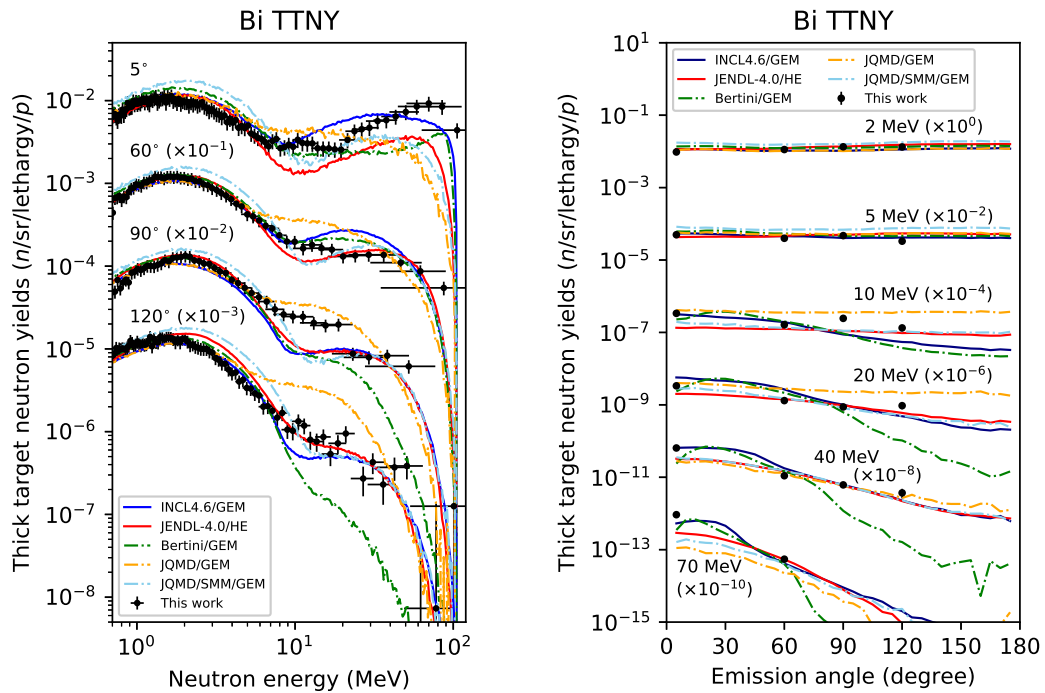


図 3-72 ビスマス標的に対する TTNY の実験結果と核反応モデルによる解析結果の比較 (左: エネルギー分布、右: 角度分布)

中性子収量

20 MeV 以下の中性子エネルギースペクトルが、蒸発成分と前平衡成分からなる 2 成分マクスウェル分布関数の和で表されると仮定して中性子収量の 20 MeV 以下エネルギー積分量（以下、中性子収量と呼ぶ）を導出した。図 3-73、図 3-74 および図 3-75 にそれぞれ 2 成分マクスウェル分布関数による鉄、鉛およびビスマス標的に対する TTNY のフィッティング結果を示す。

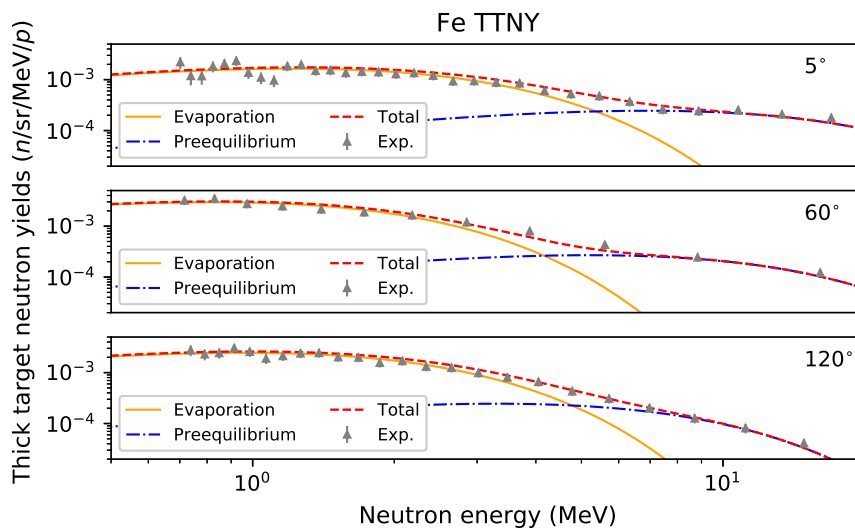


図 3-73 鉄標的に対する TTNY 測定値および 2 成分マクスウェル分布関数によるフィッティング結果

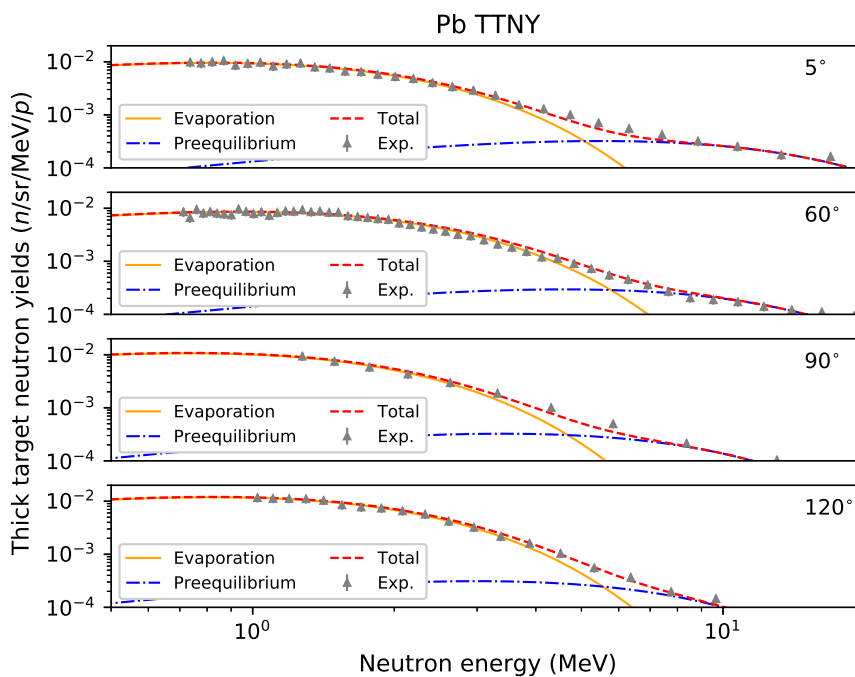


図 3-74 鉛標的に対する TTNY 測定値および 2 成分マクスウェル分布関数によるフィッティング結果

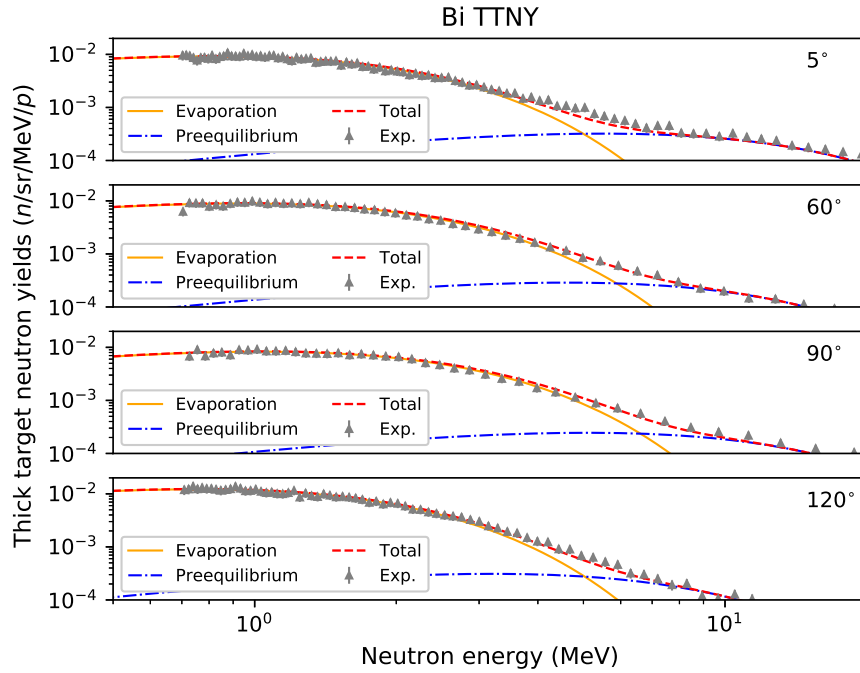


図 3-75 ビスマス標的に対する TTNY 測定値および 2 成分マクスウェル分布関数によるフィッティング結果

次に、得られた 2 成分マクスウェル分布関数フィット式より、中性子収量の角度積分量を導出した。ここで、蒸発成分の角度分布は等方と仮定し、前平衡成分の角度分布は Kalbach の角度分布関数 $f_{\mathcal{K}}(\cos \theta)$ [3.1-23] :

$$f_{\mathcal{K}}(\cos \theta) = \bar{K} \frac{2a}{e^a - e^{-a}} \exp(a \cos \theta), \quad (3.10)$$

に従うと仮定した。上式で a は角度分布の傾きを表すパラメータである。図 3-76 にフィッティング結果を示し、得られた中性子収量を表 3-9 に示す。表 3-10 に、PHITS の核反応モデル計算による解析値と実験値との比 (C/E 値) を示す。解析値と実験値との比較により、以下のことがわかった。

- 鉄に対してはどのモデルも過大評価の傾向を示す。
- 鉛およびビスマスに対しても同様に過大評価の傾向を示すが、INCL4.6/GEM が中性子収量実験値をもっともよく再現する。INCL4.6/GEM は鉛およびビスマスに対しては実験に起因する 1σ の不確かさの範囲内で一致する。
- JENDL-4.0/HE は、INCL4.6/GEM よりもやや過大評価の傾向を示す。

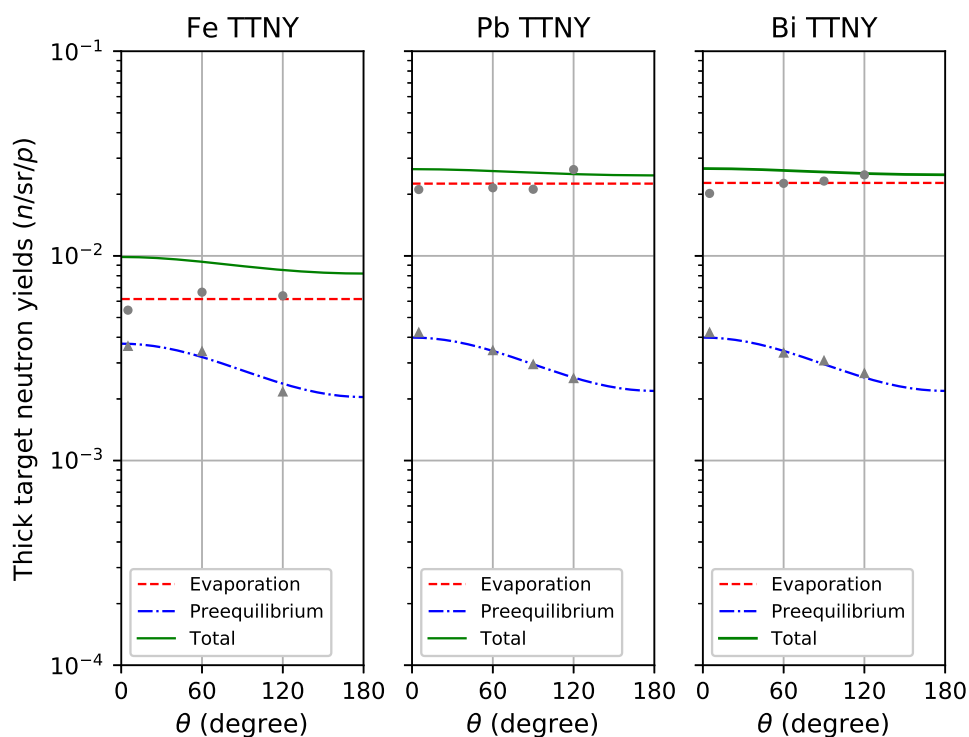


図 3-76 中性子収量の角度分布

表 3-9 測定結果のフィッティングにより得られた中性子収量

| | 蒸発成分 [n/p] | 前平衡成分 [n/p] | 全成分 [n/p] |
|--------|---------------|---------------|---------------|
| 鉄標的 | 0.077 ± 0.007 | 0.018 ± 0.002 | 0.095 ± 0.007 |
| 鉛標的 | 0.283 ± 0.030 | 0.019 ± 0.001 | 0.302 ± 0.030 |
| ビスマス標的 | 0.286 ± 0.031 | 0.019 ± 0.001 | 0.305 ± 0.031 |

表 3-10 PHITS の核反応モデル計算により得られた中性子収量の解析値と C/E 値

| モデル・ライブラリ | 鉄標的 | | 鉛標的 | | ビスマス標的 | |
|--------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | 収量 [n/p] | C/E | 収量 [n/p] | C/E | 収量 [n/p] | C/E |
| INCL4.6/GEM | 0.116 | 1.51 ± 0.12 | 0.317 | 1.05 ± 0.10 | 0.320 | 1.05 ± 0.11 |
| JENDL-4.0/HE | 0.137 | 1.78 ± 0.14 | 0.365 | 1.21 ± 0.12 | 0.342 | 1.12 ± 0.11 |
| Bertini/GEM | 0.116 | 1.51 ± 0.12 | 0.337 | 1.12 ± 0.11 | 0.342 | 1.12 ± 0.11 |
| JQMD/GEM | 0.147 | 1.91 ± 0.15 | 0.369 | 1.21 ± 0.12 | 0.355 | 1.16 ± 0.12 |
| JQMD/SMM/GEM | 0.147 | 1.91 ± 0.15 | 0.456 | 1.51 ± 0.15 | 0.463 | 1.52 ± 0.15 |

DDX

測定で得られた DDX を核反応モデルおよび評価済み核データライブラリを用いた解析値と比較した。比較対象の核反応モデルおよび評価済み核データライブラリを表 3-11 に示す。

表 3-11 DDX 測定値比較対象の核反応モデルおよび評価済み核データライブラリ

| モデル・ライブラリ名 | 核内カスケード過程 | 脱励起（蒸発）過程 |
|---------------|-----------------------|-----------------|
| INCL4.6/GEM | INCL4.6 [3.1-13] | GEM [3.1-14] |
| Bertini/GEM | Bertini INC [3.1-15] | GEM [3.1-14] |
| JQMD/GEM | JQMD [3.1-19] | GEM [3.1-14] |
| INCL++/ABLA07 | INCL++ [3.1-24] | ABLA07 [3.1-25] |
| JENDL-4.0/HE | JENDL-4.0/HE [3.1-21] | |
| JENDL-5 | JENDL-5 [3.1-26] | |

DDX 測定では、それぞれ 2 mm および 5 mm の厚さの鉛およびビスマス標的を用いたため、標的中の陽子ビームのエネルギー損失は無視できない。表 3-12 に、Bethe-Bloch の公式を用いて算出したそれぞれの標的のエネルギー損失と入射エネルギーノミナル値を示す。以下では、この入射エネルギーノミナル値を用いて実験値との比較を行った。

表 3-12 DDX 測定で用いた標的のエネルギー損失と入射エネルギーノミナル値

| 標的 | 厚さ [mm] | エネルギー損失 [MeV] | 入射エネルギーノミナル値 [MeV] |
|------|------------|------------------|-----------------------|
| 鉛 | 2 | 7.97 | 103 |
| ビスマス | 5 | 18.0 | 98 |

図 3-77 に、測定で得られた DDX と表 3-11 の核反応モデルおよび評価済み核データライブラリによる比較を示す。鉛とビスマスで、スペクトル形状に顕著な差異はなく、10 MeV 以上の前平衡成分における DDX のエネルギー分布および角度分布に対する核反応モデルの再現性は、TTNY と同様の傾向を示すことがわかった。INCL++ は従来 Fortran 言語で書かれた INCL を C++ 言語で書き直したものである。そのバージョンは 6.28 であるが、INCL4.6 と INCL++ の 2 つのバージョンの間に差は見られなかった。JENDL-4.0/HE および JENDL-5 との間にも顕著な差は見られなかった。

核反応モデルの課題抽出

TTNY および DDX 測定値と核反応モデル解析値との比較および考察により、それぞれの核反応モデルに対して以下の課題を抽出した。JQMD モデルは高度化に成功した。

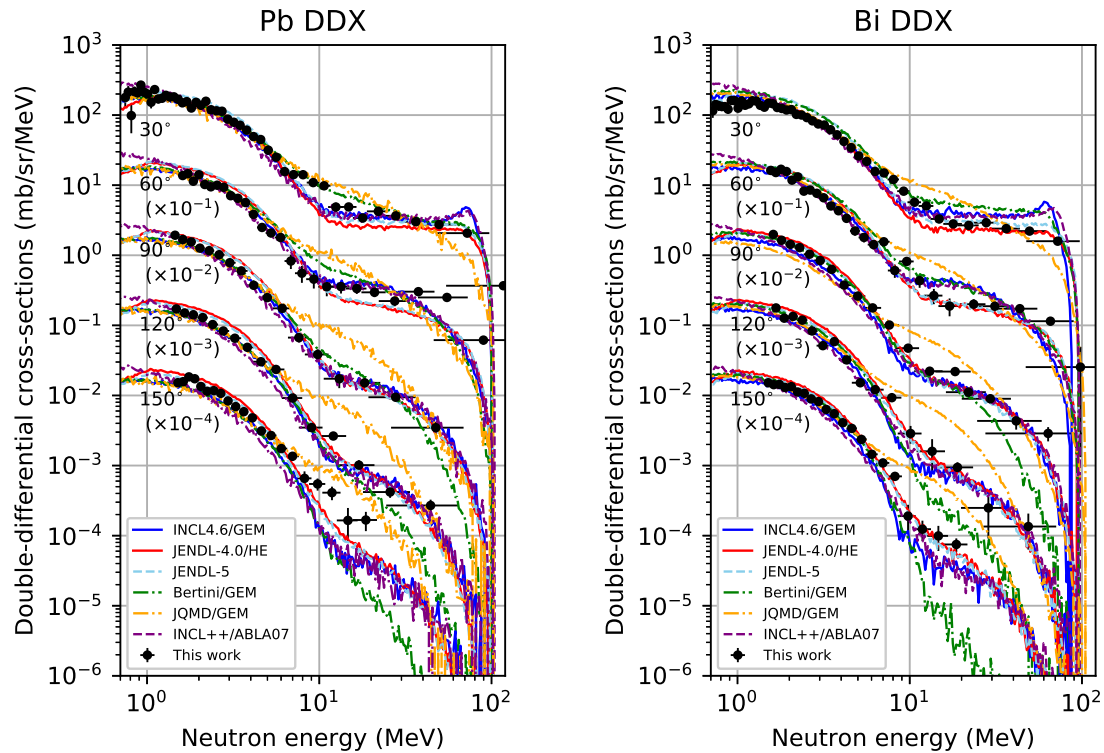


図 3-77 鉛およびビスマス標的に対する DDX の実験結果と核反応モデルによる解析結果の比較 (左：鉛標的、右：ビスマス標的)

A) INCL の課題

INCL は、前方角の 5° および 60° で DDX を過大評価する傾向を示し、これが前方角に対する TTTY 過大評価の原因となる。この過大評価は、INCL の準弾性散乱の記述に改良の余地があることを示している。300–400 MeV 領域陽子入射反応に関する先行研究 (金ら (2005) [3.1-27]) によると、標的核の基底状態 (核内核子の空間分布および運動量分布) は準弾性散乱スペクトルの形状に影響する。基底状態の記述を見直すことで準弾性散乱ピークの再現性を向上できると考えられる³。

B) JQMD の課題と高度化

JQMD は、10–30 MeV の領域で全方向にわたって DDX を過大評価し、これが TTTY 過大評価の原因となる。この過大評価は、前平衡過程から蒸発過程へと切り替わる「切替時間パラメータ (switching time parameter)」の設定に課題があることを示している。パラメータ探索の結果、鉛とビスマスのすべての測定角度で 75 fm/c が実験値をもっともよく再現することがわかった (図 3-78)。ここで、単位の [fm/c] は光が真空中で 1 fm (フェムトメートル) 進むのに要する時間 ($1 \text{ [fm]} = 3.34 \times 10^{-24} \text{ [s]}$) を表す。このような切替時間パラメータによる再現性の傾向は、鉄標的に対する 140 MeV 陽子入射 180° 方向 DDX に対しても同様であることがわかった。その結果を図

³この結果により INCL の準弾性散乱の記述に課題があることが明らかとなり、準弾性散乱の記述の改良に向けた陽子準弾性散乱測定実験を J-PARC の陽子ビームを用いて実施している [3.1-28]。

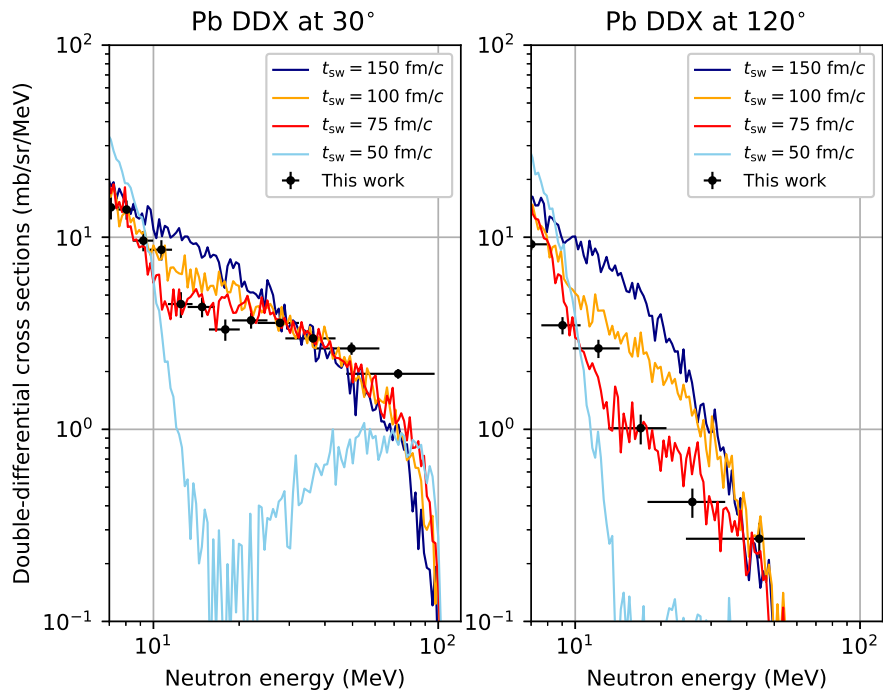


図 3-78 JQMD の切替時間パラメータの設定による鉛標的に対する中性子エネルギースペクトルの比較 ($t_{sw} = 150$ fm/c (デフォルト値)、100 fm/c、75 fm/c および 50 fm/c)

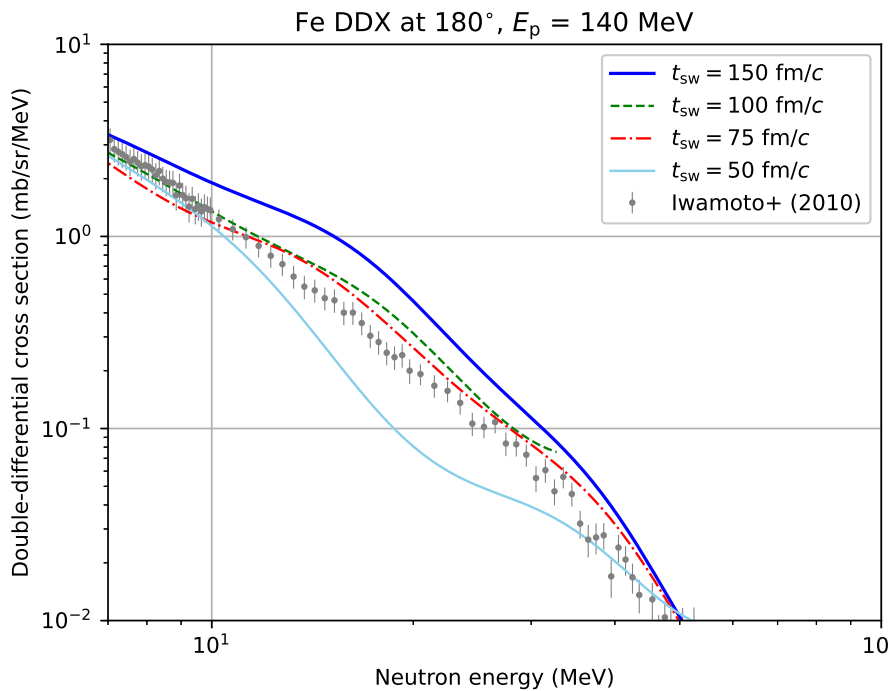


図 3-79 JQMD の切替時間パラメータの設定による鉄標的に対する 140 MeV 陽子入射 180° 方向中性子生成 DDX の比較 ($t_{sw} = 150$ fm/c (デフォルト値)、100 fm/c、75 fm/c および 50 fm/c、実験値は岩元ら (2010)[3.1-30] より引用)

3-79 に示す。ここで実験値は文献値 (岩元ら (2010)[3.1-30]) を用いた。これにより、100 MeV 入射領域における切替時間パラメータの最適値は 75 fm/c となることが明らかとなり、JQMD モ

デルの高度化に成功した。

先行研究（仁井田ら (1995) [3.1-19]）によると、切替時間を $150 \text{ fm}/c$ に設定した JQMD は、数百 MeV 以上の陽子入射反応のエネルギースペクトルをよく再現する。JQMD のような古典的な枠組みでは、動力学的な過程から平衡状態に達するまで時間が入射エネルギーに依存し、入射エネルギーに応じた切替時間パラメータの設定が必要と考えられる。これは今後の課題である。

C) Bertini INC の課題

Bertini INC は、後方角で DDX を大幅に過小評価し、これが後方角における TTNY の過小評価の原因となる。これは、Bertini INC が、原子核平均場の効果を取り入れていないことに起因している。JQMD は運動方程式中の核子間相互作用により平均場の効果が自然な形で考慮される（図 3-80）。INCL では核子間相互作用が考慮されないが、屈折効果（refraction）により原子核平均場の効果が近似的に考慮される。先行研究（高田 (1995)[3.1-29]）に示されたような屈折効果を Bertini INC に組み込む必要があると考えられる。

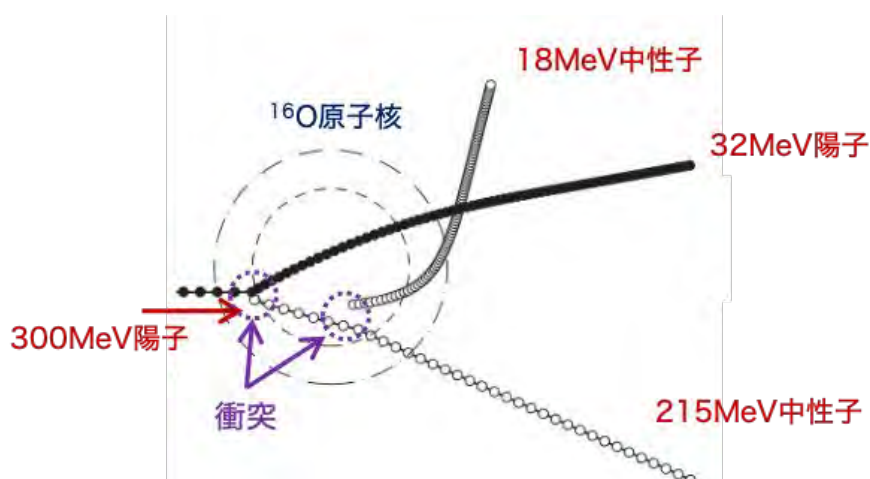


図 3-80 JQMD 計算による 300 MeV 陽子入射 ^{16}O 標的核反応における放出粒子の軌道（岩元ら (2010)[3.1-31]）

D) JENDL の課題

JENDL は DDX の形状をおおむね再現するが、TTNY で 5 度のピークを過小評価しているため、5 度のような最前方では準弾性散乱によるエネルギースペクトルの評価を見直す必要が生じる可能性がある。図 3-81 と図 3-82 に、それぞれ鉛とビスマスに対する 10 MeV 以下における DDX の比較を示す。TTNY と同様に、INCL4.6/GEM は実験値を良く再現する一方で、JENDL は実験値を過大評価する。本測定値に合うように核温度（nuclear temperature）の評価値を見直す必要があると考えられる。

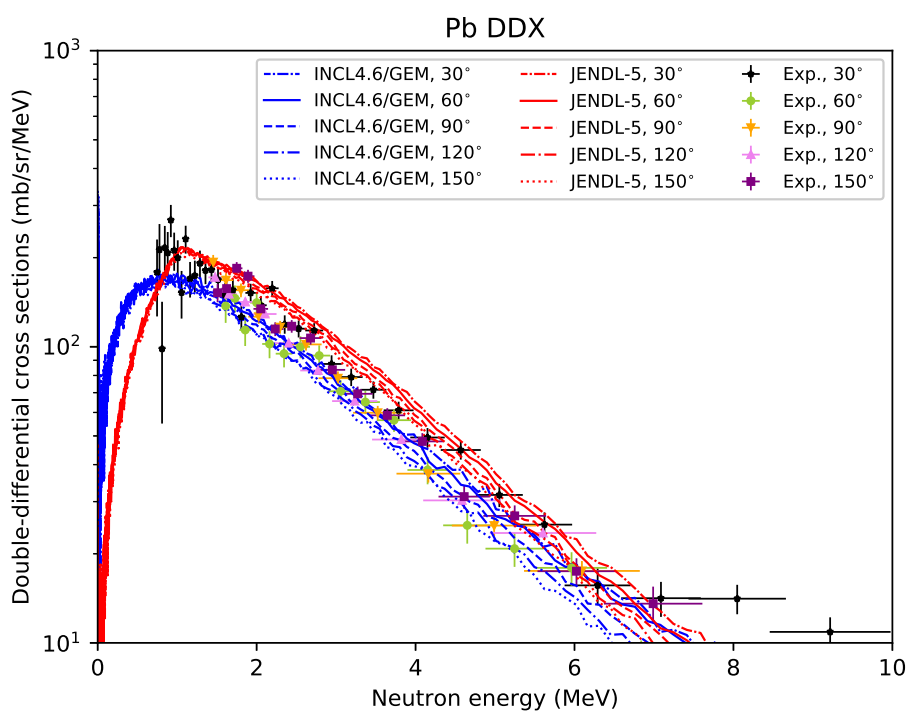


図 3-81 鉛標的に対する 10 MeV 以下における DDX の比較

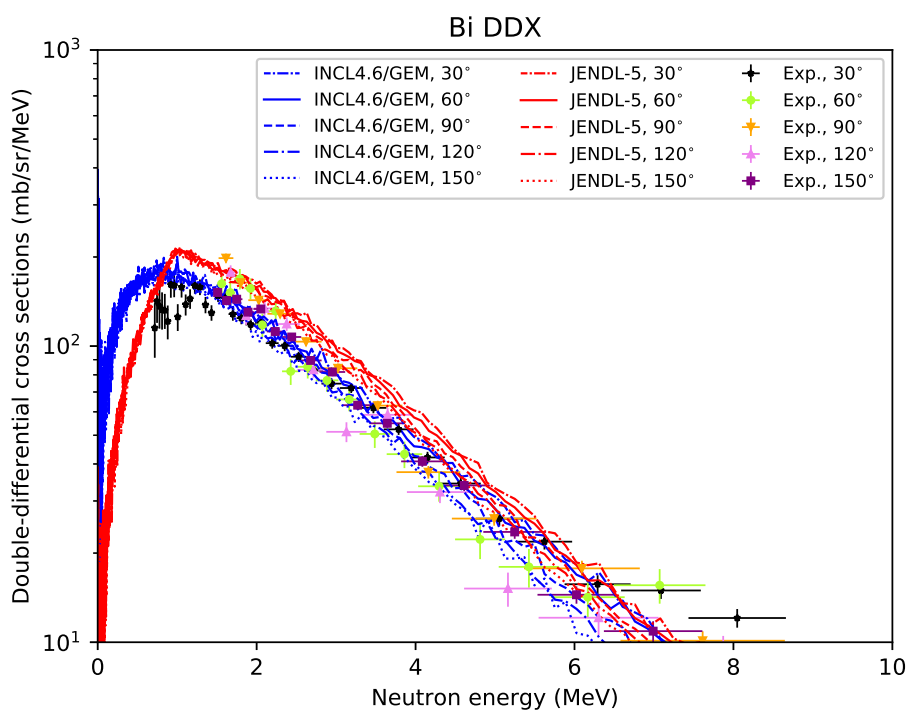


図 3-82 ビスマス標的に対する 10 MeV 以下における DDX の比較

(11) 中性子多重度の評価【R4】

実験で得られた DDX を用いて、以下の手順により陽子入射中性子多重度 (neutron multiplicity : 1 回の核反応で放出される中性子の平均数) を求めた。

- DDX の中性子エネルギースペクトルが、蒸発成分と前平衡成分の和で表されるとし、それぞれマクスウェル分布関数およびシグモイド関数で表されると仮定する：

$$\begin{aligned}
 f(E_n) &= f_{\text{evap}}(E_n) + f_{\text{preeq}}(E_n) \\
 &= K \frac{E_n}{\tau^2} e^{E_n/\tau} + \frac{C}{1 + e^{(E_n - \epsilon)/\alpha}}
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

ここで、 K 、 τ 、 C 、 ϵ および α はフィッティングパラメータを表す。このうち τ は核温度と呼ばれる。表 3-13 に蒸発成分のフィッティングパラメータ評価値を示し、図 3-83 および図 3-84 に、それぞれ鉛およびビスマス標的に対する DDX のフィッティング結果を示す。

表 3-13 DDX 蒸発成分のフィッティングパラメータ評価値

| | K [mb/sr] | τ [MeV] |
|--------------------------|------------------|-----------------|
| $^{\text{nat}}\text{Pb}$ | 474.4 ± 23.2 | 1.10 ± 0.05 |
| ^{209}Bi | 456.6 ± 10.6 | 1.16 ± 0.03 |

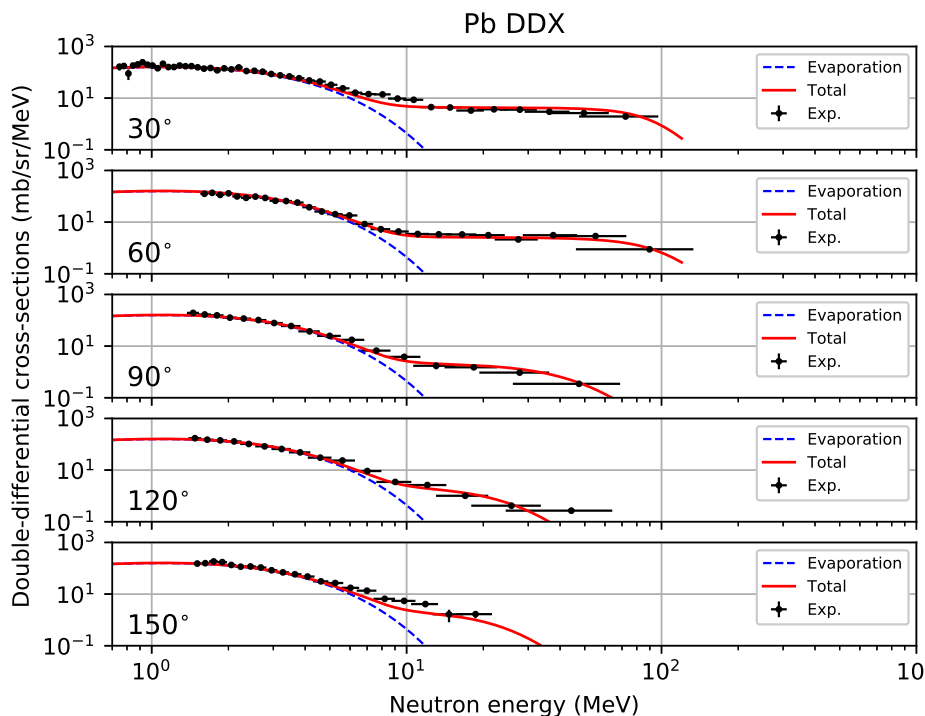


図 3-83 鉛標的に対する DDX 測定値および提案式によるフィッティング結果

- 次に、TTNY の検討のときと同様に、前平衡成分のエネルギー積分量の角度分布が DDX の角度分布が Kalbach の角度分布関数 $f_K(\cos \theta)$ (式 (3.10)) に従うと仮定して全角度で積分

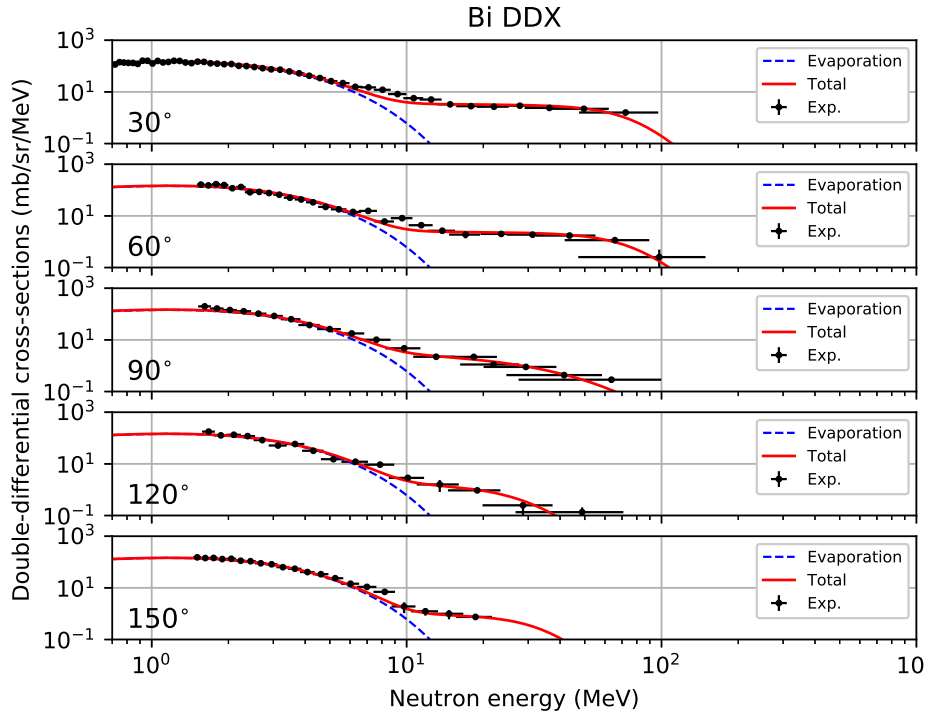


図 3-84 ビスマス標的に対する DDX 測定値および提案式によるフィッティング結果

し、前平衡成分の中性子生成断面積を求める：

$$\sigma_{(p,xn)}^{\text{preeq}} = 2\pi \int d(\cos\theta) f_{\mathcal{K}}(\cos\theta) = 4\pi\bar{K} \quad (3.12)$$

蒸発成分は等方分布を仮定し、蒸発成分の中性子生成断面積を次式により求める：

$$\sigma_{(p,xn)}^{\text{evap}} = 4\pi K \quad (3.13)$$

表 3-14 に前平衡成分のフィッティングパラメータ評価値を示す。

表 3-14 DDX 前平衡成分のフィッティングパラメータ評価値

| | C [mb/sr] | a [MeV] |
|--------------------------|------------------|-----------------|
| $^{\text{nat}}\text{Pb}$ | 118.9 ± 13.1 | 1.18 ± 0.24 |
| ^{209}Bi | 96.2 ± 10.9 | 1.12 ± 0.01 |

3. 上で得られた中性子生成断面積と陽子入射核反応断面積を用いて次式により中性子多重度 x を求める：

$$x = \frac{\sigma_{p,xn}}{\sigma_{p,\text{reac}}} \quad (3.14)$$

ここで、陽子入射核反応断面積は PHITS と INCL++ を用いた解析により評価し、鉛およびビスマスに対してそれぞれ $\sigma_{p,\text{reac}}^{\text{Pb}} = 1730 \pm 8$ [mb] および $\sigma_{p,\text{reac}}^{\text{Bi}} = 1777 \pm 15$ [mb] の値を

用いた。

図 3-85 に、上の手順で評価した鉛およびビスマス標的に対する中性子多重度の角度分布を示し、表 3-15 に中性子多重度の評価結果を示す。

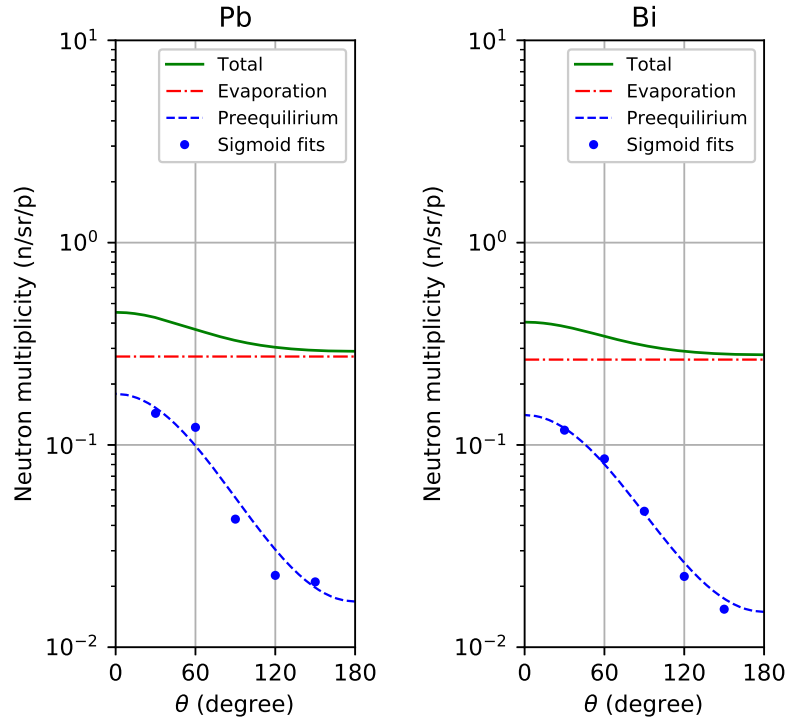


図 3-85 鉛およびビスマス標的に対する中性子多重度の角度分布

表 3-15 鉛およびビスマスに対する中性子多重度の評価値（括弧内の数値は 1σ の不確かさの相対値を表す）

| 反応 | 蒸発成分 $[n/p]$ | 前平衡成分 $[n/p]$ | 合計 $[n/p]$ |
|----------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| 103 MeV $^{nat}\text{Pb}(p, xn)$ | 3.44 ± 0.17 (5%) | 0.86 ± 0.09 (11%) | 4.30 ± 0.19 (5%) |
| 98 MeV $^{209}\text{Bi}(p, xn)$ | 3.32 ± 0.11 (2%) | 0.70 ± 0.08 (11%) | 4.02 ± 0.11 (3%) |

得られた中性子収量と核反応モデルによる解析値との比較を表 3-16 に示す。TTNY 測定結果と同様に、INCL4.6/GEM が実験値にもっとも近い値となった。

先行研究（岩元ら (2019)[3-2.5]）において、鉛に対する陽子入射中性子多重度が複数の入射エネルギー点に対して評価されている。図 3-86 の左側のパネルは、これらの評価値をもとにベイズ統計モデルの一種であるガウス過程回帰（GPR: Gaussian process regression）[3.1-35] を用いて中性子多重度を推定したものである。200 MeV を超える入射エネルギー領域ではおよそ 13% (1σ) の不確かさを考慮する必要があるのに対し、100 MeV 以下ではおよそ 50% の不確かさを考慮しなければならない。この大きな不確かさは DDX 実験データの不足に起因している。本実験により、103 MeV の入射エネルギー点で $x = 4.30 \pm 0.19 [n/p]$ のデータを新たに取得したため、中性子多

表 3-16 鉛およびビスマスに対する中性子多重度評価値と核反応モデルによる解析値との比較

| | 103 MeV $^{nat}\text{Pb}(p, xn)$ | | 98 MeV $^{209}\text{Bi}(p, xn)$ | |
|---------------|----------------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|
| | 中性子多重度 $[n/p]$ | C/E | 中性子多重度 $[n/p]$ | C/E |
| INCL4.6/GEM | 4.35 | 1.01 ± 0.05 | 4.28 | 1.06 ± 0.03 |
| JENDL-4.0/HE | 4.88 | 1.14 ± 0.05 | 4.53 | 1.13 ± 0.03 |
| JENDL-5 | 4.88 | 1.14 ± 0.05 | 4.54 | 1.13 ± 0.03 |
| JQMD/GEM | 4.95 | 1.15 ± 0.05 | 4.78 | 1.19 ± 0.03 |
| INCL++/ABLA07 | 4.95 | 1.15 ± 0.05 | 4.91 | 1.22 ± 0.03 |

重度の推定値は、図 3-86 の右側のパネルにおける青色の帯から赤色の帯へと変化する。すなわち本実験により、103 MeV 付近で中性子多重度の推定精度が向上していることが示された。

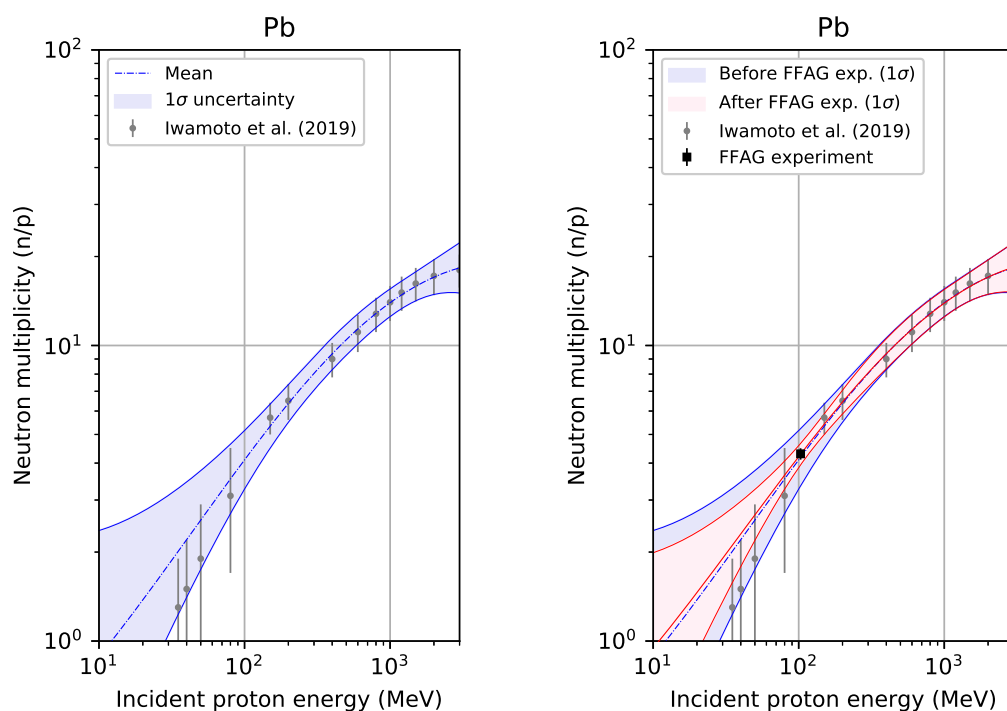


図 3-86 鉛標的に対する陽子入射中性子多重度の推定値（左：本実験前の推定値、右：本実験前後の推定値、薄色の帯は 1σ の不確かさを表す。）

(12) 中性子源強度に与える影響評価【R4】

得られた核破砕中性子データの不確かさが核破砕中性子源強度に与える影響を調査した。

陽子ビームを標的に照射したときの中性子源強度 S [n/s] と中性子収量 Y [n/p] およびビーム電流 I [A] との間には、次の関係が成り立つ。

$$S = \frac{1}{e} I_p Y \quad (3.15)$$

ここで、 e は電気素量 ($= 1.602176634 \times 10^{-19}$ C) を表す。表 3-10 より、鉛・ビスマス標的における中性子収量の不確かさは相対値で 10% であることが示された。ビーム電流値は、通常ファラデーカップで読み取るが、読み取りで懸念となるファラデーカップからの二次電子放出は観測されなかったため、KUCA の ADS 炉物理実験におけるビーム電流値の不確かさは中性子収量の不確かさに比べて無視できると考えられる。したがって、中性子源強度値の不確かさも中性子収量と同等 (10%) と考えられる。卞ら (2018) [3.1-36] による 100 MeV 陽子ビームを用いた KUCA 未臨界炉心の反応率測定実験では、計算値と実験値との間に大幅な乖離 (C/E 値で 0.2 ~ 1.4) があることが示されている。本検討で推定した中性子源強度の不確かさは、このような中性子源を用いた実験の詳細解析に役立つと考えられる。

ADS 実機では炉心出力が一定の 800 MW (年間約 250 kg の MA 核変換能力に相当) となるように中性子源強度、すなわちビーム電流を調整する。そのため ADS 実機的设计では、ビーム電流に中性子収量と同程度の不確かさを考慮しなければならない。今後は本実験で得られた中性子収量に関する知見を反映して、ADS 実機で使用するビーム窓の放射線損傷量、発熱量、誘導放射能などの中性子源強度に関連するパラメータの感度解析や中性子収量に起因する不確かさ解析を実施する必要がある。

(13) ^{237}Np 核分裂計数管を用いた核破砕中性子場測定【R4】

鉛標的を真空チェンバ内の中心位置に設置して、測定角 -60° の位置に ^{237}Np 核分裂計数管を置いて、京都大学臨界集合体実験装置 (KUCA) を用いた未臨界炉物理実験の標的を模擬した 107 MeV 陽子入射鉛標的核反応により形成される核破砕中性子場における ^{237}Np の核分裂率を測定した。図 3-87 に、測定における ^{237}Np 核分裂計数管の配置を示し、表 3-17 に測定条件を示す。

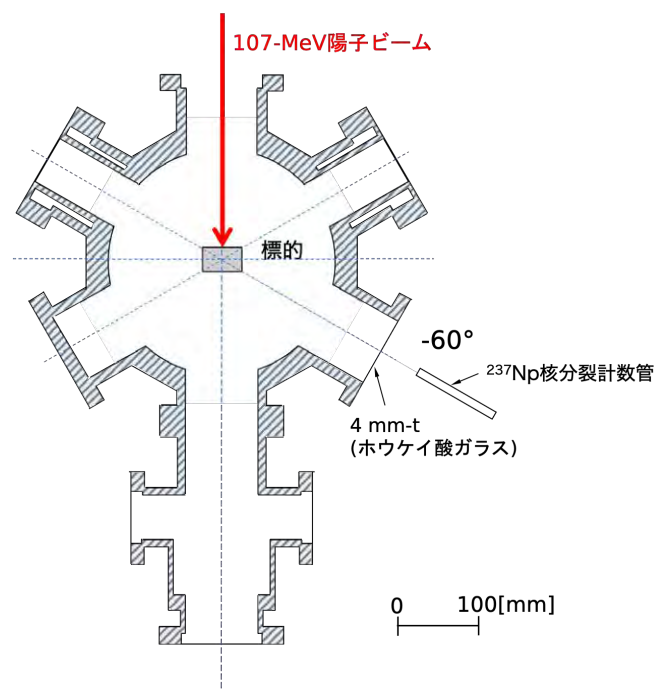


図 3-87 核破砕中性子場測定における ^{237}Np 核分裂計数管の配置

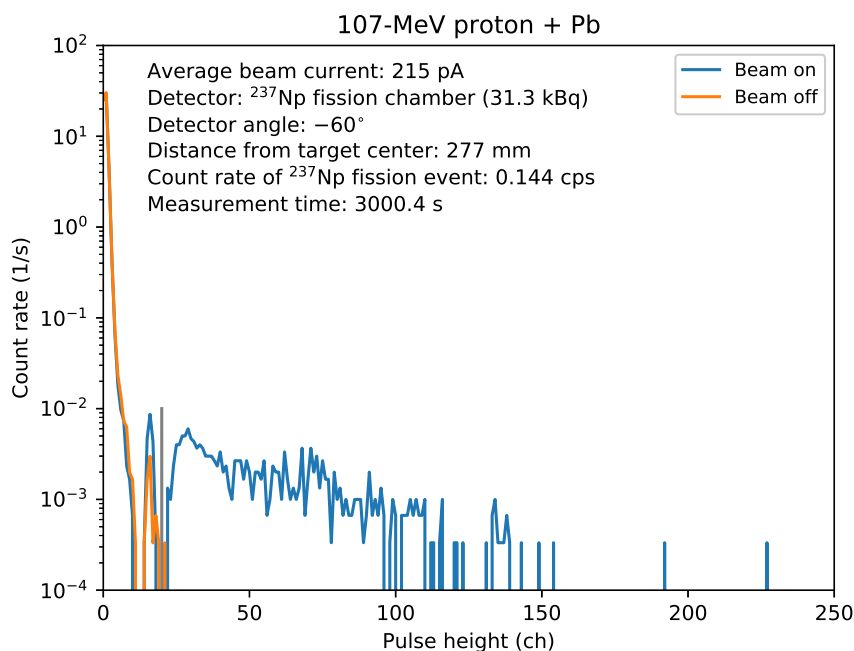


図 3-88 測定で得られた ^{237}Np 核分裂計数管の波高スペクトル (Beam on : 陽子ビーム照射時、Beam off : 陽子ビーム非照射時)

表 3-17 ^{237}Np 核分裂計数管を用いた核破碎中性子場測定条件

| 項目 | 単位 | 値 |
|--|-------|--------|
| 平均ビーム電流 | [pA] | 215 |
| ^{237}Np 放射能 | [kBq] | 31.3 |
| 検出角 | [°] | -60 |
| ビーム照射時測定時間 | [s] | 3000.4 |
| ビーム非照射時測定時間 | [s] | 3014.0 |
| 標的中心から ^{237}Np 核分裂計数管先端までの距離 | [mm] | 277 |
| 印加電圧 | [V] | 400 |

図 3-88 に、測定で得られた ^{237}Np 核分裂計数管の波高スペクトルを示す。ビーム非照射時は ^{237}Np のアルファ崩壊事象のみが検出され、ビーム照射時は核破碎中性子と ^{237}Np との核分裂反応による核分裂事象が観測された。測定時間 3000.4 秒における ^{237}Np 核分裂事象は 0.144 ± 0.007 cps であった。

INCL4.6/GEM による 60° 方向の TTNy の解析値と ^{237}Np 中性子入射核分裂断面積データを用いて、次式に基づいて測定位置における ^{237}Np 核分裂計数管の核分裂事象検出率 C を求めた。

$$C = \epsilon N \int dE_n \sigma_f(E_n) \phi_n(E_n) \quad (3.16)$$

ここで、 ϕ_n は、 ^{237}Np 核分裂計数管有感部における中性子フラックスを表し、4 mm 厚のホウケイ酸ガラスに対する中性子の透過率を考慮した。 σ_f は ^{237}Np は中性子入射核分裂断面積を表し、

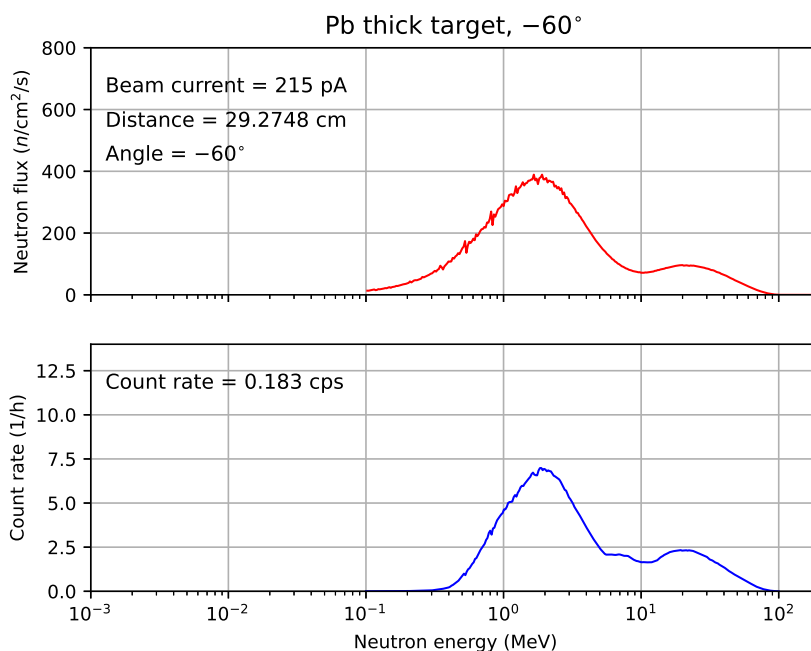


図 3-89 実験条件における中性子フラックスのエネルギースペクトル（上）および ^{237}Np 核分裂計数率解析値（下）

図 3-18 の値を用いた。 ϵ は ^{237}Np 核分裂計数管の検出効率を表し、PHITS を用いた粒子輸送解析により $\epsilon = 0.998$ とした。 N は、 ^{237}Np 核分裂計数管に含まれる ^{237}Np の数を表し、表 3-1 より 3.064×10^{18} 個である。

解析で得られた中性子フラックスのエネルギースペクトルと ^{237}Np 核分裂率解析値を図 3-89 に示す。解析により核分裂事象の検出率は 0.183 cps となり、実験値に対する解析値の比（C/E 値）は 1.27 ± 0.06 となった。解析に使用した TENDL-2019 における 0.1 MeV を超えるエネルギー領域の ^{237}Np 核分裂断面積評価値の不確かさは高々 1% であることから、この核分裂計数率の過大評価は、主に式 (3.16) 中の中性子フラックス ϕ_n に起因していると考えられる。図 3-71 より、INCL4.6/GEM は 10 MeV 以上のエネルギー領域における TTTY を過大評価する。そのため、上で議論した INCL4.6/GEM における準弾性散乱の記述の改良により、核分裂計数率の再現性は改善の方向に向かうと予想される。先述のように、準弾性散乱の記述の改良は今後の課題である。TTY および DDX 測定結果とともに、本測定で得た ^{237}Np 核分裂計数率データも核反応モデルの検証に活用しなければならない。

(14) 短パルス化の技術開発【R1-R4】

京大と連携して、中性子生成 DDX や TTTY の実験に向けた FFAG 加速器における陽子ビームの短パルス化の技術開発を進めた。詳細は 3.1.2 節に示す。

(15) 令和4年度のまとめ

令和3年度までに実施したDDXおよびTTNY測定実験よりもさらに高めるため、有機液体シンチレータを用いて追加の実験を実施した【(7)節および(8)節に記載】。 ^{237}Np 核分裂計数管を用いて、京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)を用いた未臨界炉物理実験の標的を模擬した100 MeV陽子入射に対する中性子場を測定した【(13)節に記載】。データを取りまとめ、ADS核設計に用いられる核計算モデルとの比較計算を行った【(10)節、(11)節および(13)節に記載】。取得した中性子データを用いて、核破砕中性子データの不確実性がADSの核設計に重要となる核破砕中性子源強度に与える影響を調査した【(12)節に記載】。

3.1.2 陽子ビーム短パルス化技術開発（再委託先：京都大学）

(1) 短パルス化の検討【R1】

図3-90にFFAG加速器における陽子ビームの短パルス化の原理を示す。加速器を周回する陽子はエネルギーと時間を座標とする位相空間内に占められる。この位相空間内を占める陽子ビームを断熱デバンチングしたのち、(1)バンチ回転（バンチローテーション法）、(2)キッカーによる切り出し（キッカー法）、の2段階の過程を経て整形することで、ビームのパルス時間幅を短くすることができる。

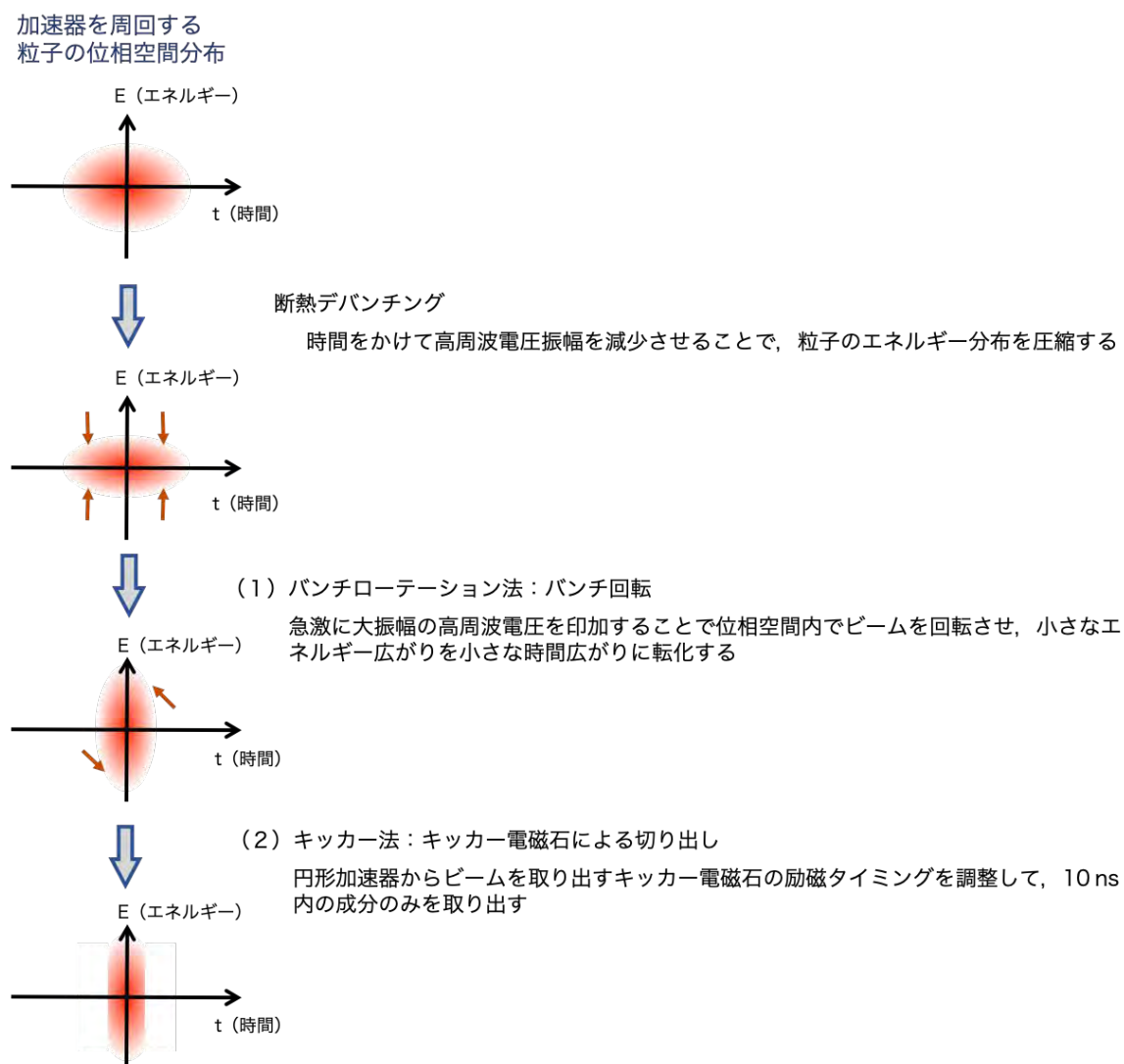


図 3-90 FFAG 加速器における陽子ビーム短パルス化の原理

令和元年度に、計算機上で様々な高周波運転パターンによるビームの挙動を試験する多粒子追跡シミュレーションコードを開発し、短パルス化のための加速器運転手法の検討を行った。このシミュレーションコードでは、高周波加速空洞の周波数、電圧振幅、波形をそれぞれ任意に設定でき、得られるビームパルス幅を予測および評価することができる。また作成した運転パターンを任意波形発生器の入力データに変換して実機で運転すれば、実験による検証も可能である。本

シミュレーション結果から、短パルス化運転時におけるビームの位相空間広がり抑制するためには加速終了間際の断熱デバンチングが重要であることが判明した。以下に、シミュレーションによる検討結果を示す。

過去の測定より、通常運転パターン時の加速器周回ビームのパルス長は、FWHM でおおよそ 70~100 ns 程度と見積もられており、それをシミュレーションで再現したものが図 3-91 である。図中の上のパネルはシミュレーション結果の位相空間図を表す。横軸は加速高周波に対する位相で、高周波の周波数 3.9 MHz より、 100° が約 70 ns のパルス長に相当する。下のパネルは位相空間分布をもとに実空間についてヒストグラム化したもので、前述した変換手法をもとに横軸をパルス長 (ns) に変更している。下のパネルから通常の加速取り出し手法ではバンチ長はおおよそ 70 ns 程度であることが予想できる。

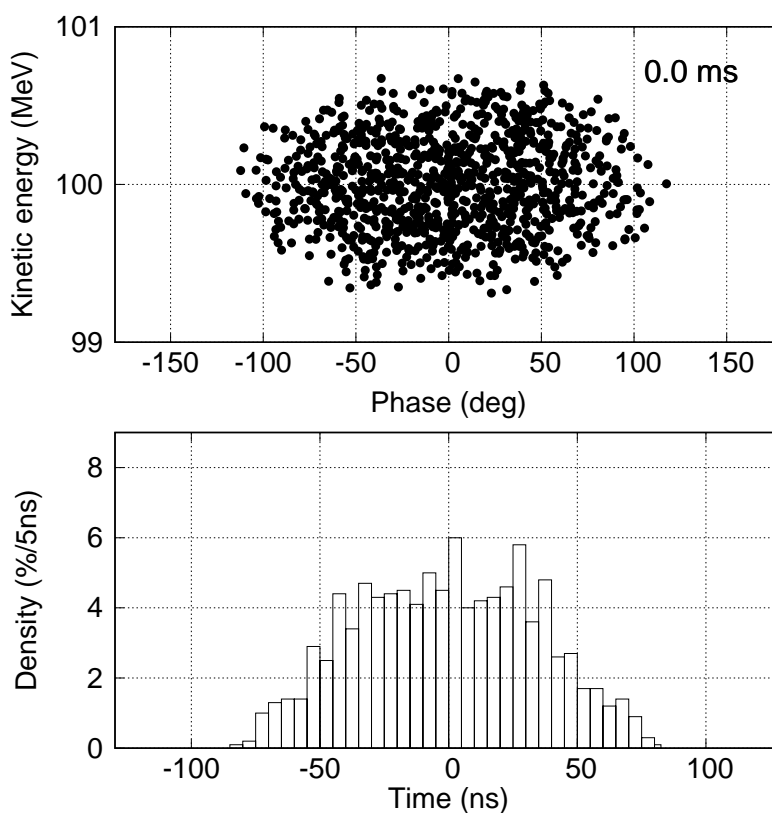


図 3-91 加速終了間際の縦方向位相空間粒子分布

図 3-92 は、シミュレーション上で 4.0 ms の時間をかけた断熱デバンチングと、それに続くバンチ回転を行った後の粒子分布の一例である。上図より高周波捕獲領域の非線形性によって辺縁部の分布が歪んでいることがわかる。それに対応するヒストグラムを表した下図から、大部分の粒子は ± 20 ns 以内の領域に収まっており、この部分だけをキッカーで切り出せば、経験的に標準偏差でおおよそ 35 ns のパルスビームが得られることが期待される。これらのシミュレーション結果から、さらなる短パルス化を実現するうえで、高周波捕獲領域の非線形性を抑制することが有効であると推察できる。

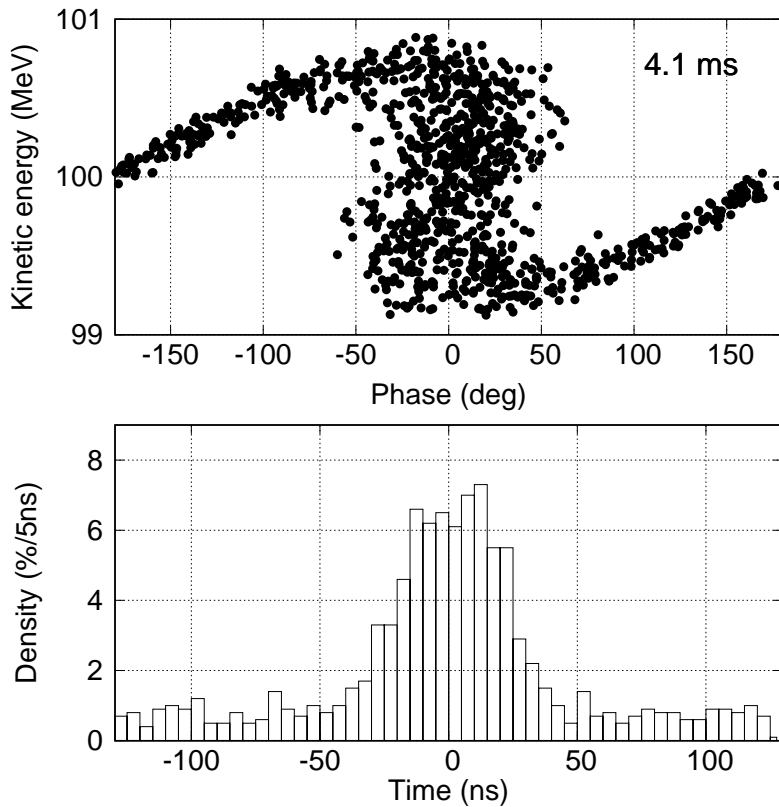


図 3-92 断熱デバンチとバンチ回転を行った後の縦方向位相空間粒子分布

(2) 短パルスビーム検出モニタの開発【R2】

陽子ビーム短パルス化を検証するための一検出モニタを令和元年度に開発し、令和2年度に真空チェンバ上流側のビームライン上に設置した(図3-93)。図3-94に示すように、開発したモニタは、角形のチェンバ内に置かれた銅製の電極によって静電的にビームプロファイルを検出する装置である。加速器から取り出される短パルスビームを検出するにあたっては、ビーム取り出し用パルス機器からのノイズが大きな問題となる。そのためこのモニタの開発では、以下のノイズ対策を施した。

- ビームの直接ヒットによる真電流ノイズに対して電極が保護されるよう、既設のビーム輸送管より大きな口径を設けた構造とした。
- ビーム取り出しパルス機器からのノイズを遮断するために、絶縁フランジを前後に挟む構造とした。
- ビームの横方向分布に依らず、縦方向分布の測定が可能となるように、ピックアップ電極がビーム軸を円筒状に囲むように配置した。

また、モニタの周波数帯域は、目標とする 10 ns を十分カバーするように設計した。



図 3-93 真空チェンバ上流側近傍のビームライン上に設置された短パルスビーム検出モニタ

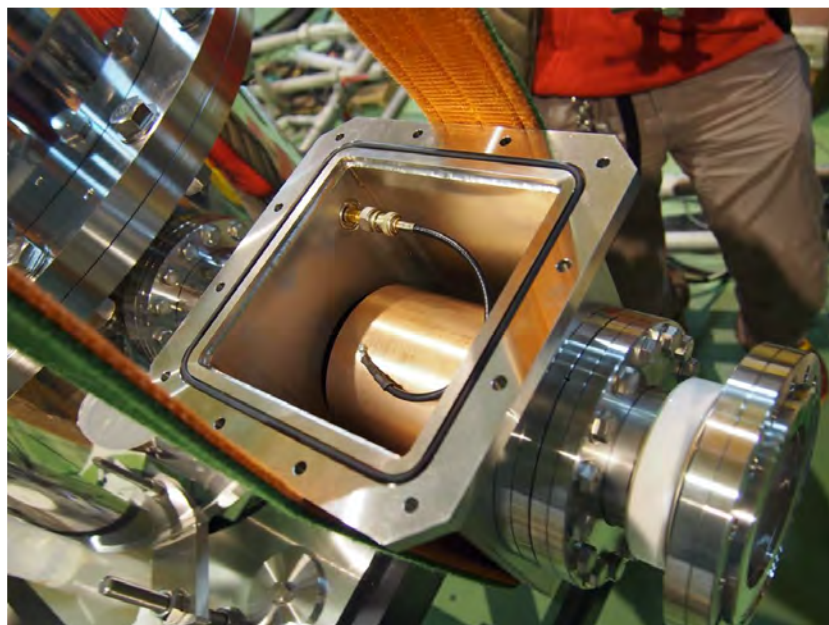


図 3-94 短パルスビーム検出モニタ（角形チェンバ内に銅製の円筒電極が内蔵されている）

(3) 短パルス化【R2】

パルス検出モニタを設置後、令和元年度の検討結果をもとに、FFAG 加速器の従来の設計である 100 ns 以上の陽子ビームのパルス時間幅を DDX および TTNV 測定実験の要求値である 10 ns に短くする短パルス化を次の手順で進めた。

1. バンチ生成用高周波運転パターンを作成し、主リングの高周波加速空洞に印加した。図 3-95 はそのときの高周波電圧モニタ出力（検出効率 1/1000）を表している。この運転パターンは 25.0 ms の加速部、1.0 ms の断熱デバンチ部、0.5 ms のバンチ回転部から構成される。加速部と断熱デバンチ部の境界では、安定位相の整合を取るために事前の測定で得られた 30° の高周波位相ジャンプが与えられている。断熱デバンチ部では、周波数を一定のまま電圧振幅を徐々に減少させることによって、粒子集団のエネルギー広がりが増大することを狙っている。この過程には、ビーム進行方向の位相振動周期（ここでは 5.9 kHz すなわち周期 0.17 ms）に比べて十分長い時間をかける必要があり、シミュレーションを用いた検討により 1.0 ms を採用した。続くバンチ回転部は、急激に高い電圧振幅を加えることによって、時間-エネルギーで張られる位相空間内でビームを回転させ、エネルギー広がり小さい粒子集団を時間的に短い集団に転化させるもので、ビーム進行方向の位相振動の 1/4 周期後にもっとも短いバンチが得られると期待される。ここでは、高周波システムの許す最大の ± 4 kV を印加した。

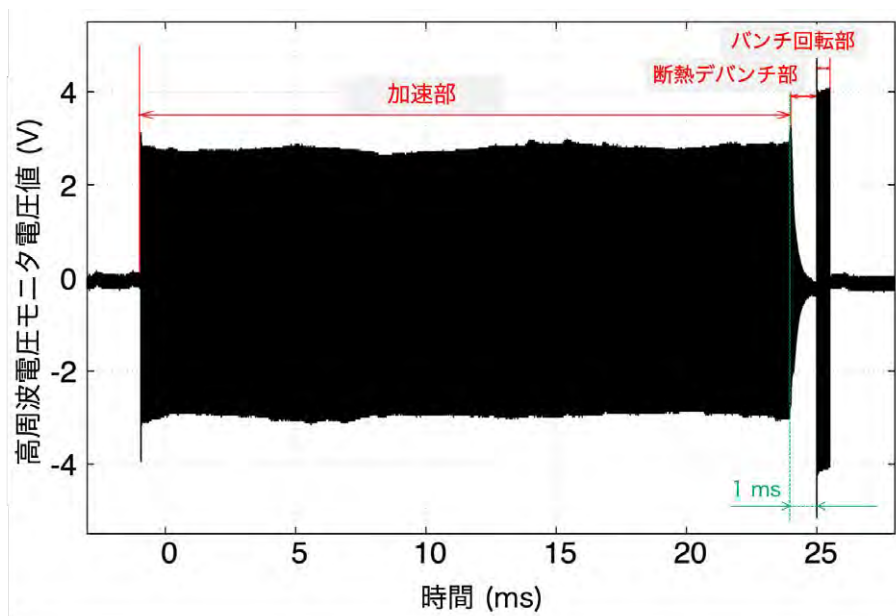


図 3-95 短パルスビーム生成に用いた高周波運転パターン（0 秒付近で FFAG 加速器に陽子ビームを入射し、時刻 24 ms まで加速する。その後 25 ms まで断熱デバンチを行い、一時的にビームの時間幅を広げる。時刻 25 ms からビームバンチの進行方向における回転を行い、幅を短くして時刻 25.5 ms にビームを取り出す）

2. 前述の高周波運転パターンを用いてビームを加速し、主リングバンチモニタでビームを観測した結果、図 3-96 のような出力が得られた。バンチモニタは信号出力端子に取り付けられ

た電圧増幅器で出力の正負が反転されるので、モニタを通過するビームの電荷密度が負電圧として出力されている。図を見ると、期待されたとおり断熱デバンチ部でピーク電荷密度が徐々に減少しており、バンチ回転部で急激にピーク密度の増減が始まっている。図3-96のバンチ回転部を拡大したものを図3-97に示す。この図より、バンチ回転の周期は0.085 msであることがわかり、これはビーム運動学から求められる値とほぼ一致することがわかった。最初にピーク電荷密度が極大を迎えるのが1/4回転に相当するタイミングで、図3-96中のBの位置である。加速終了直後(A)とバンチ1/4回転後(B)の部分を拡大してバンチ波形をプロットしたものを図3-98に示す。この図から、ガウス関数フィッティングを行ったところ、(A)と(B)のバンチ長はそれぞれ標準偏差にして30 nsと8 nsと見積もられた。

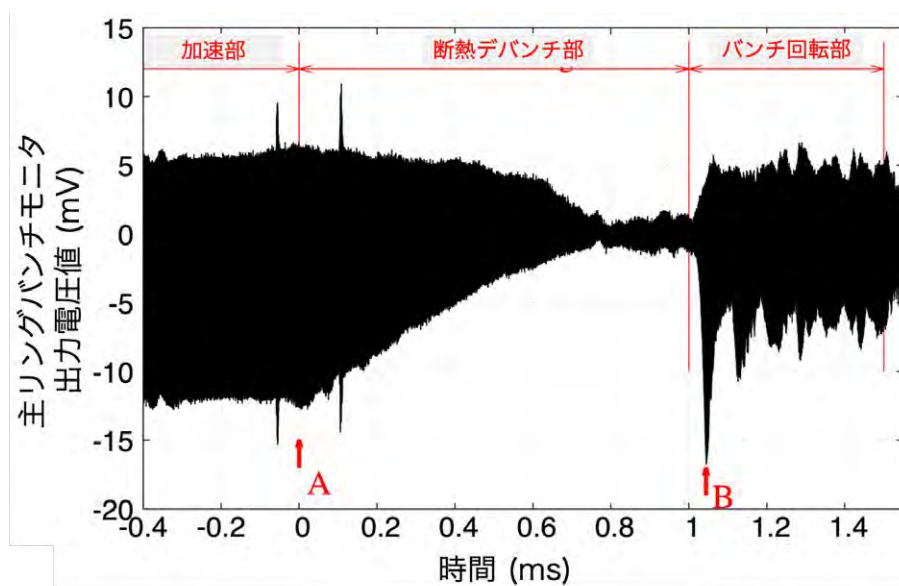


図3-96 主リングバンチモニタで観測した主リング周回ビーム（横軸は加速終了時(A)を原点にとってある。1/4バンチ回転後(B)にバンチ長がもっとも短くなる。出力は負極となる）

- 次に、令和元年度に購入した短パルスビーム検出モニタ（図3-94）を用いて、主リングから取り出された短パルスビームを検証した。取り出しに関連するパルス機器（キッカー電磁石とセプタム電磁石）を図3-96の(B)のタイミングに最適化して励磁し、真空チェンバ上流側のビームライン上に設置された短パルスビーム検出モニタ（図3-93）を用いてビームのプロファイルを観測した。その出力を図3-99に示す。図のように、モニタ出力にはキッカー電磁石に由来するものと思われる ± 0.1 V程度のノイズが $3 \mu\text{s}$ 以上にわたって見られたが、そのノイズの波形はビームの有無に関わらず、高い再現性を持つことがわかった。得られたビームの有無による出力結果をそれぞれ差し引くことで、図3-100に示された短パルス波形が得られることを確認できた。このパルス波形をガウス関数でフィッティングすることで、その幅は標準偏差で8 ns程度であることを確認した。

以上のように、DDXおよびTTNY測定の要求値である10 nsの陽子ビーム短パルス化を令和2年度に達成した。

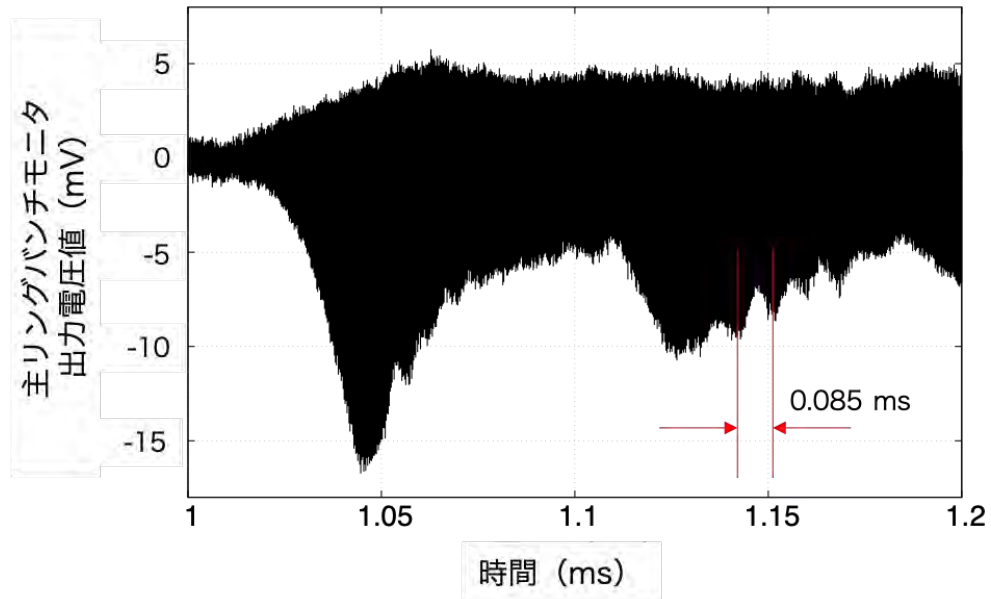


図 3-97 主リングバンチモニタで観測した主リング周回ビームのバンチ回転部の拡大図

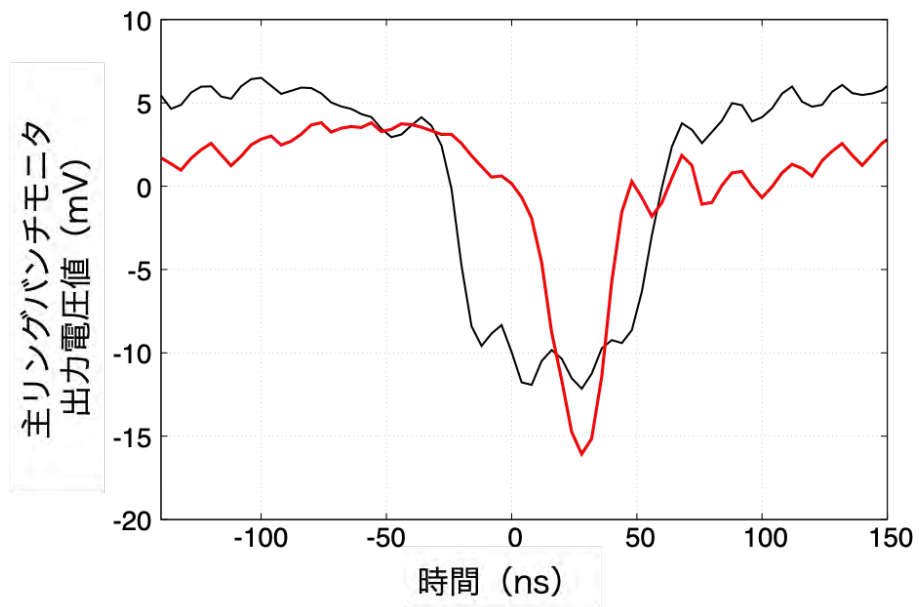


図 3-98 主リングバンチモニタで観測した加速終了時 (A、黒) および 1/4 バンチ回転後 (B、赤) のバンチ波形 (図 3-96 と同一のデータ、モニタ出力は負極となり、B の場合には時間幅が短いビームとなることを確認した)

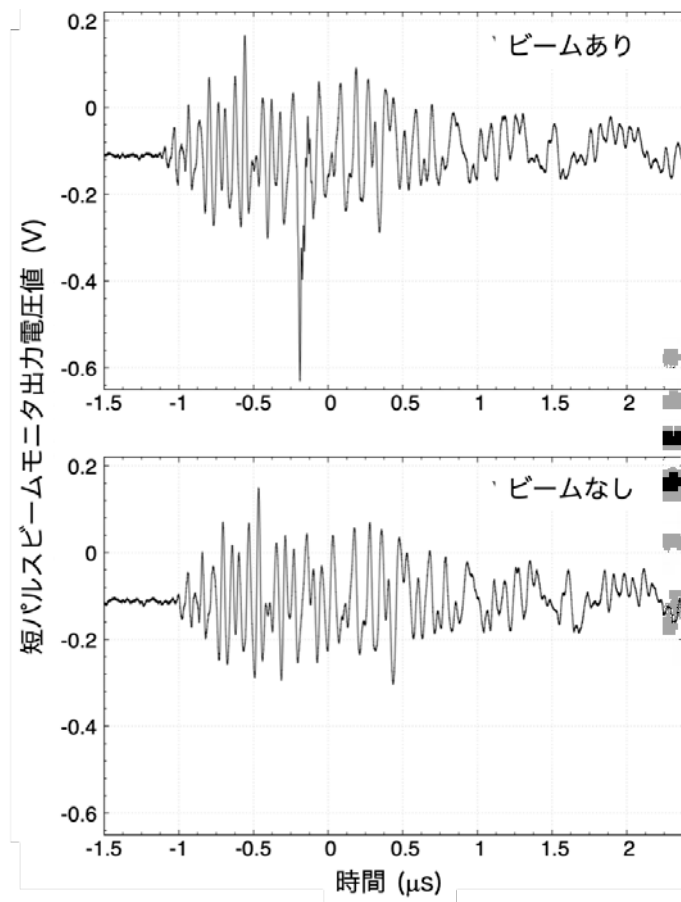


図 3-99 短パルスビーム検出モニタの出力（ビームあり、なしの比較、出力は負極）

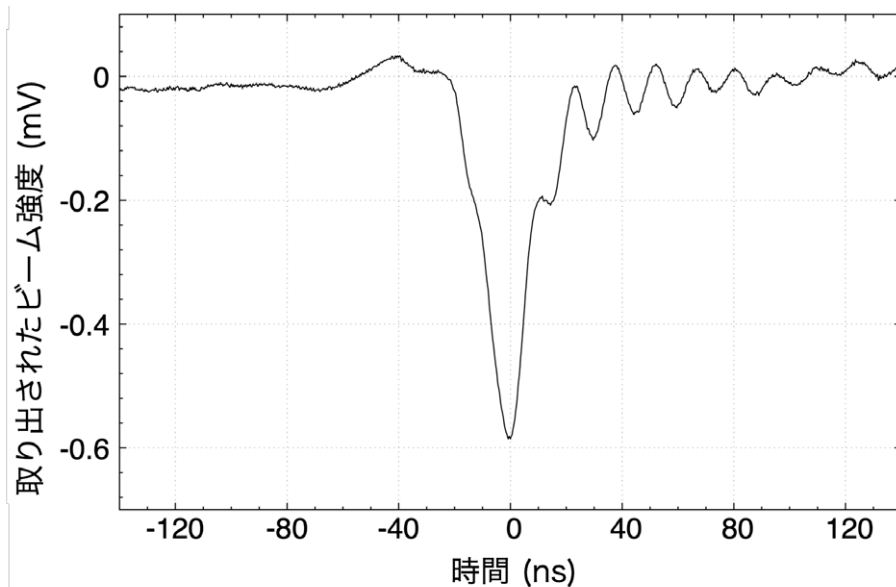


図 3-100 取り出された短パルスビームの時間構造（出力は負極）

(4) パルスビーム調整の高度化【R3】

パルスビーム調整の高度化にあたり、短パルスビームモニタの改良を行った。具体的には、短パルスビームモニタ内のヘッドアンプを交換することでモニタ出力のS/N比を改善し、パルスビームの増幅率を調整できるようにした。さらに、TTNYおよびDDX測定でパイルアップを抑制することを目的に長パルスモードの検討を行うとともに、長パルスビームと短パルスビームを選択的に取り出せるようにしてパルスビーム調整の高度化を行った。

ヘッドアンプの交換（S/N比の改善および増幅率調整機構の追加）

ヘッドアンプの交換では、短パルスビームモニタに内蔵しているアンプ（ヘッドアンプ）をエヌエフ回路設計ブロック社製のもの（型番SA-220F5）からイタリアCAEN社製のもの（型番A1423B）に交換した。これにより、パルスビームの増幅率を18 dB～54 dBの範囲で調整可能となり、短パルスビームモニタがさまざまなビーム強度およびビームピーク密度に対応できるようになった。図3-101に、ヘッドアンプ交換後の短パルスビームモニタで観測された短パルスビームのプロファイルを示す。図3-100の交換前に比べてノイズが低減し、S/N比が改善されていることがわかる。

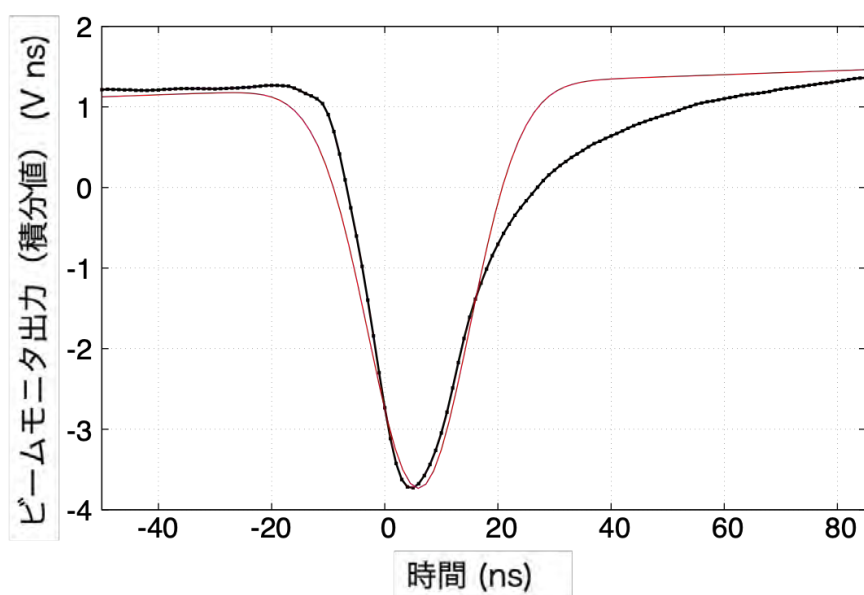


図 3-101 ヘッドアンプ交換後の短パルスビームモニタで観測された短パルスビームの時間構造（黒線、出力は負極、赤線は標準偏差9 nsの正規分布を表す）

長パルスモードの検討

パイルアップの抑制は、パルスビームを長パルス化することによって実現できる。具体的には、ビームを加速終了後、速やかに断熱デバンチングを行うことによってビームを位相空間上で平坦化し、それをバンチ回転を行わずにそのまま加速器から取り出すことで長パルスビームが得られ、これをDDXおよび核分裂中性子測定に用いることでパイルアップを抑制できる。以下では、長パ

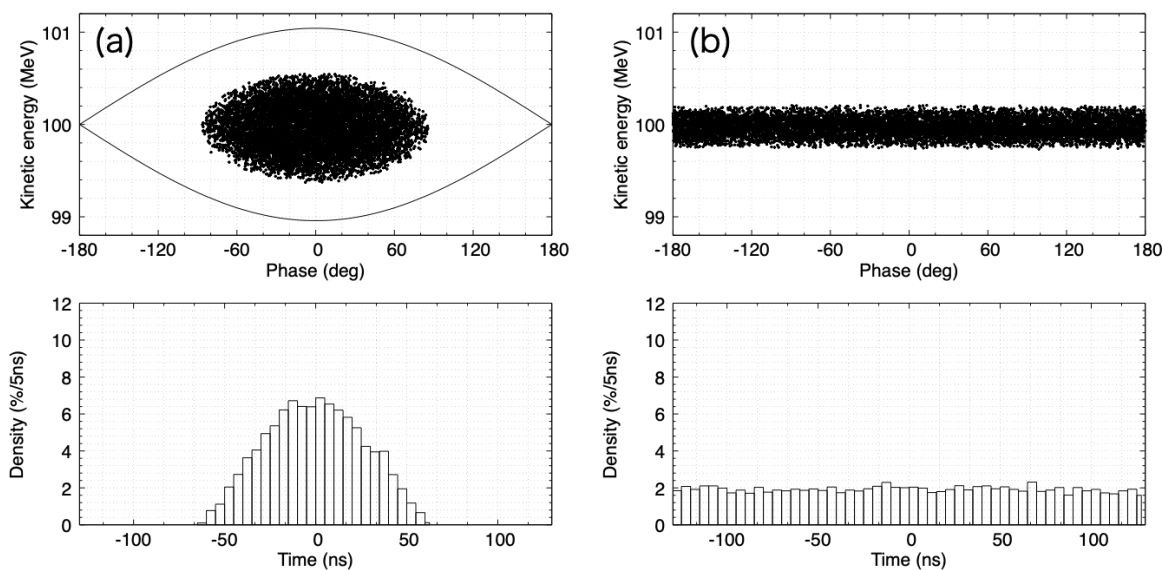


図 3-102 多粒子追跡シミュレーションによる加速終了直後（左）と断熱デバンチング後（右）の縦方向粒子分布の解析結果

ルスビームの取り出しを「長パルスモード」、図 3-90 によるビーム取り出しを「短パルスモード」と呼ぶ。図 3-102 に、多粒子追跡シミュレーションによって得られた加速終了直後および断熱デバンチング後の縦方向粒子分布を示す。断熱デバンチング後のビームは、加速器一周（ $250 \mu\text{s}$ ）にわたって一様に分布し、さらに運動量広がり最小の状態となっていることがわかる。このタイミングでビームを取り出すことで、原理的には最長 $250 \mu\text{s}$ までの長パルスビームが得られるが、実際には取り出し用パルス機器（キッカー電磁石およびセプタム電磁石）のフラットトップ磁場の長さで制限される。平坦化した長パルスビームが得られることを確認するため、長パルスモードでのビーム取り出し実験を実施した。長パルスモードと短パルスモードとの違いは、ビーム取り出し（キッカー電磁石とセプタム電磁石の励磁）のタイミング（長パルスモードではバンチ回転前、短パルスモードではバンチ回転 $1/4$ 周後）のみで、加速から断熱デバンチングまでの過程は短パルスモードと同一であるため、長パルスモードでの運転では短パルスモードでの高周波運転プログラムをそのまま使用した。

図 3-103 に、測定で得られた長パルスモードでの縦方向ビームの時間構造を示す。ここでは比較のために、加速器への入射ビーム強度を $1/4$ 程度に落とした短パルスモードでの測定結果もプロットしている。長パルスモードでのビームパルス長を FWHM で評価するとおよそ 150 ns となった。これにより、ビーム幅が 10 ns 以下 (1σ) の短パルスビームと FWHM で約 150 ns の長パルスビームを選択的に取り出せることが示された。

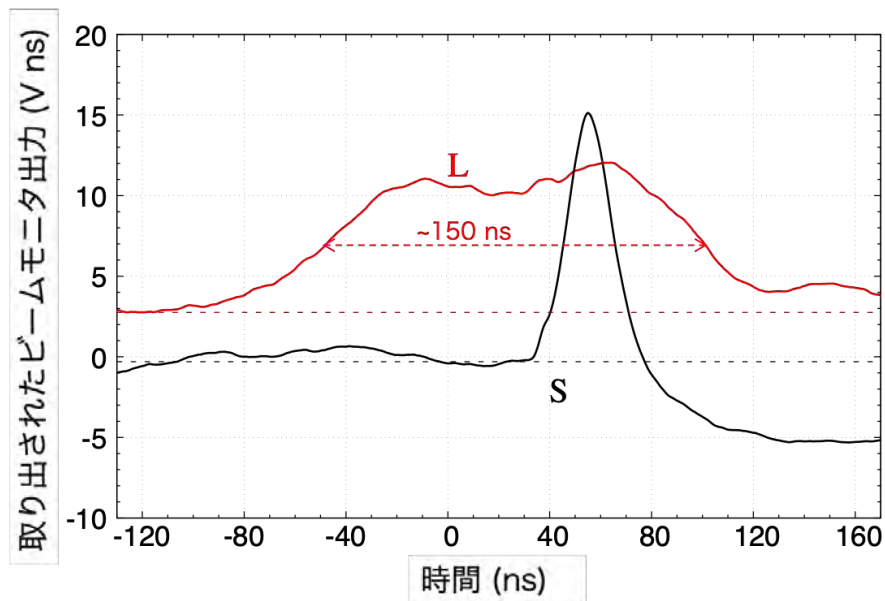


図 3-103 短パルスモード (S) と長パルスモード (L) での縦方向ビームの時間構造 (短パルスビームモニタによる測定、ヘッドアンプを 2 台直列に使用しているため、モニタの出力は正極となる)

(5) パルス調整機能の改良【R4】

令和 3 年度までにパルス幅を 10 ns に短縮する研究目標を達成した。短パルス化技術をさらに高度化するため、原子力機構が行う測定およびデータ取得と連携して、ビームパルスのリアルタイム測定技術の開発を実施するとともに、核分裂片の測定において検出器の数え過ぎの防止に有効となる、時間的に平坦なビーム構造が得られるようビームパルス調整機能を改良した。その具体的な実施内容を以下に示す。

令和 3 年度までに実施した短パルスビームモニタを用いたパルス長の測定では、取り出し機器に由来するノイズが大きく、真のパルス長は得るにはオフラインでノイズを差し引く必要があった。そこで令和 4 年度は、高ノイズ環境下の照射実験中でもパルス長をリアルタイムで監視できるように、プラスチックシンチレーション検出器 (以下、シンチレーション検出器) を用いてパルスビームのリアルタイム監視法を確立した。これにより、照射実験中でもパルス長の調整を簡便に行えるようになった。

測定では、シンチレーション検出器を真空チェンバの近傍に設置し (図 3-104)、加速器運転中における検出器の出力信号を、加速器制御室に置かれたオシロスコープを用いて観測した。観測されたパルスビームの信号を図 3-105 に示す。ここで、黄色の線は主リングバンチモニタで観測された周回ビームの信号を表し、淡緑色の線はシンチレーション検出器の出力信号を表す。主リングバンチモニタでは、周期的なノイズの影響で、取り出し時刻の 2.5 μ s におけるパルス長を正確に読み取れないのに対し、シンチレーション検出器を用いることで、取り出されたパルスビームの時間構造を明瞭に観測できていることがわかる。このときのパルス長は FWHM でおよそ 137 ns となり、10 ns 未満の短パルスビームに比べて時間的に平坦な長パルスビーム構造がリアルタイム

で得られることを確認した。

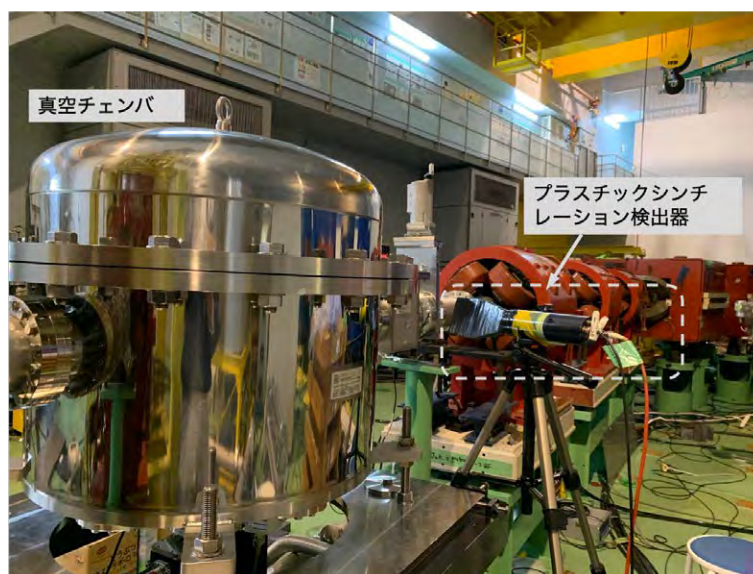


図 3-104 真空チェンバの近傍に設置したプラスチックシンチレーション検出器



図 3-105 プラスチックシンチレーション検出器の出力信号（淡緑色）と主リングバンチモニタの出力信号（黄色）

参考文献

- [3.1-1] 令和元年度 文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 原子力システム研究開発事業 「FFAG 陽子加速器を用いた ADS 用核データの実験的研究」成果報告書（令和2年3月、日本原子力研究開発機構）
- [3.1-2] 令和2年度 文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 原子力システム研究開発事業 「FFAG 陽子加速器を用いた ADS 用核データの実験的研究」成果報告書（令和3年3月、日本原子力研究開発機構）
- [3.1-3] 令和3年度 文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 原子力システム研究開発事業 「FFAG 陽子加速器を用いた ADS 用核データの実験的研究」成果報告書（令和4年3月、日本原子力研究開発機構）
- [3.1-4] Tanimura Y., Fujii K., Tsutsumi M., et al., Neutron Fluence Monitoring System in Mono-energetic Neutron Fields at FRS/JAEA, Prog. Nucl. Sci. and Technol., vol.4, 2014, pp.388-391.
- [3.1-5] ROOT: Analyzing Petabytes of Data, Scientifically, <https://root.cern>,（参照：2023年3月31日）.
- [3.1-6] Sato T, Iwamoto Y, Hashimoto S, et al., Features of Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) Version 3.02, J. Nucl. Sci. and Technol., vol.55, no.6, 2018, pp.684–690.
- [3.1-7] Dickens JK, SCINFUL: A Monte Carlo Based Computer Program to Determine a Scintillator Full Energy Response to Neutron Detection for E_n between 0.1 and 80 MeV: User's Manual and FORTRAN Program Listing, 1988, ORNL-6462, Oak Ridge National Lab. TN (USA).
- [3.1-8] Satoh D, Sato T, Shigyo N, et al., SCINFUL-QMD: Monte Carlo Based Computer Code to Calculate Response Function and Detection Efficiency of a Liquid Organic Scintillator for Neutron Energies up to 3 GeV, JAEA-Data/Code, 2006-023 (2006).
- [3.1-9] Satoh D, Sato T, Improvements in the Particle and Heavy-ion Transport Code System (PHITS) for Simulating Neutron-response Functions and Detection Efficiencies of a Liquid Organic Scintillator. J. Nucl. Sci. and Technol., vol.59, no.8, 2022, pp.1047-1060.
- [3.1-10] Shibata K, Iwamoto O, Nakagawa T, et al., JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering, J. Nucl. Sci. and Technol., vol.48, no.1, 2011, pp.1-30.
- [3.1-11] Koning A.J, Rochman D, Sublet J-Ch, et al., TENDL: Complete nuclear data library for innovative nuclear science and technology, Nucl. Data Sheets vol.155, 2019, pp. 1–55.

- [3.1-12] 岩元大樹, 高励起原子核の核分裂確率の統一的な記述, 核データニュース, vol.128(164), 日本原子力学会核データ部会, pp.13–25.
- [3.1-13] Boudard A, Cugnon J, David J-C, et al., New Potentialities of the Liège Intranuclear Cascade Model for Reactions Induced by Nucleons and Light Charged Particles, Phys. Rev. C, vol. 87, 2013, p.014606.
- [3.1-14] Furihata S., Statistical Analysis of Light Fragment Production from Medium Energy Proton-induced Reactions, Nucl. Instr. Methods Phys. Res. B, vol.171, 2000, pp.251–258.
- [3.1-15] Bertini HW, Intra-nuclear cascade calculation of the secondary nucleon spectra from nucleon–nucleus interactions in the energy range 340 to 2900 MeV and comparisons with experiment, Phys. Rev., vol.188, 1969, pp.1711–1730.
- [3.1-16] Cugnon J, Henrotte P. The low-energy limit of validity of the intranuclear cascade model. Eur Phys J A. 2013;16:393–407.
- [3.1-17] Yariv Y, Aoust Th, Boudard A, et al., Intra-nuclear cascade models at low energy? Proc. International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2007 (ND2007).
- [3.1-18] Duarte H., Particle production in nucleon induced reactions above 14 MeV with an intranuclear cascade model, Phys Rev C 2007;75:024611.
- [3.1-19] Niita, K., Chiba, S., Maruyama, T., et al., Analysis of the (N, xN') reactions by quantum molecular dynamics plus statistical decay model, Phys. Rev. C, vol. 52, 1995, p.2620.
- [3.1-20] Iwamoto, O., Development of a comprehensive code for nuclear data evaluation, CCONE, and validation using neutron-induced cross-sections for uranium isotopes, J. Nucl. Sci. and Technol., vol.44, no.1, 2006, pp.687-697.
- [3.1-21] Kunieda, S., Iwamoto, O, Iwamoto, N., Overview of JENDL-4.0/HE and benchmark calculations, In Proceedings of the 2015 Symposium on Nuclear Data; 2015 Nov. 19–20, Tokai (Japan), 2016.
- [3.1-22] Ziegler, J.F., SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter, <http://www.srim.org>, (参照 : 2023 年 3 月 31 日).
- [3.1-23] Kalbach C. Systematics of continuum angular distributions: Extensions to higher energies. Phys Rev C 1988;37:2350–2370.
- [3.1-24] Leray S, Mancusi D, Kaitaiemi P, et al. Extension of the Liège Intra Nuclear Cascade model to light ion-induced collisions for medical and space applications. J Phys: Conf Series 2013;420:012065.

- [3.1-25] Kelic A, Ricciardi MV, Schmidt K-H. Proceedings of the Joint ICTP-IAEA Advanced Workshop on Model Codes for Spallation Reactions, ICTP Trieste, Italy, 4-8 February 2008, D. Filges et al., Eds., IAEA INDC(NDS)-530, Vienna (2008) 181.
- [3.1-26] Iwamoto O, Iwamoto N, Kunieda S, et al. Japanese Evaluated Nuclear Data Library version 5: JENDL-5, J Nucl Sci Technol. 2023, (published online).
- [3.1-27] Kin T, Saiho F, Hohara S, et al. Proton production cross sections for reactions by 300- and 392-MeV protons on carbon, aluminum, and niobium, Phys Rev C 2005;72:014606.
- [3.1-28] 明午伸一郎, 山口雄司, 岩元大樹, 400MeV – 3GeV 陽子における Al(p,xp) 反応の二重微分断面積 (DDX) の測定, 2; 400MeV 陽子を用いた試験, 日本原子力学会 2023 年春の年会, 東京大学.
- [3.1-29] Takada H. Nuclear medium effects in the intranuclear cascade calculation. J Nucl Sci Technol. 1995;33(4):275–282.
- [3.1-30] Iwamoto Y, Satoh D, Hagiwara M, et al. Measurements and Monte Carlo calculations of neutron production cross-sections at 180° for the 140 MeV proton incident reactions on carbon, iron, and gold, Nucl Instrum Methods Phys Res A 2010 vol.620, 2010, pp.484-489.
- [3.1-31] Iwamoto H, Imamura M, Koba Y, et al. Proton-production double-differential cross sections for 300-MeV and 392-MeV proton-induced reactions, Phys Rev C 2010;82:034604.
- [3.1-32] 菅原隆徳, 平井康志, 西原健司他, 加速器駆動核変換システム用三次元炉心解析コード ADS3D の整備, JAEA-Research 2014-024, (2015).
- [3.1-33] 岩元大樹, 明午伸一郎, 中野敬太他, 加速器駆動システム上部構造の放射線遮蔽解析, JAEA-Research 2021-021, (2022).
- [3.1-34] Iwamoto H, Meigo S. Estimation of uncertainty in lead spallation particle multiplicity and its propagation to a neutron energy spectrum, J Nucl Sci Technol. 2019;57(3):276–290.
- [3.1-35] Iwamoto H. Generation of nuclear data using Gaussian process regression. J Nucl Sci Technol. 2020;57(8):932–938.
- [3.1-36] Pyeon CH, Vu TM, Yamanaka M., et al. Reaction rate analyses of accelerator-driven systems with 100 MeV protons at Kyoto University Critical Assembly, J Nucl Sci Technol. 2018;55(2):190–198.

3.2 高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究

本研究では、重核種に対する 100 MeV の陽子入射核分裂における核分裂片の質量数に対する収率（質量数分布）を測定する。当初は、重核種として鉛、ビスマスおよび非密封 MA を用いて高励起核種の核分裂に関する実験を実施することを希望していた。放射線管理関係者との議論の結果、FFAG 加速器施設の管理区域における非密封 MA の使用は放射線使用許可上難しいが、鉛とビスマスを用いた実験は計画どおり実施できることがわかった。そこで、本研究で対象とする標的は ADS の核破砕標的として使用される重核種の鉛およびビスマスとした。

令和元年度から令和 3 年度は、核分裂片質量数分布測定に必要となる真空チェンバ、データ収集装置および核分裂片検出器の設計および製作を行い、開発した検出器の動作試験を実施した（真空チェンバの製作は 3.1.1 (5) 節を参照）。令和 3 年度および令和 4 年度にそれぞれ鉛 (^{208}Pb) およびビスマス (^{209}Bi) 標的を用いた実験を FFAG 加速器施設において実施した。

以下に、本研究項目の令和 4 年度までの研究成果についてまとめる。ここでは、既往年度の成果報告書 [3-2.1][3-2.2][3-2.3] の図表を含めた内容も再掲（一部改変）している。

(1) 検出器システムの検討【R1】

本研究では、運動エネルギー 100 MeV の陽子入射核分裂における核分裂片の質量数に対する収率（質量数分布）を測定する。本研究で構築するセットアップを図 3-106 に示す。100 MeV の陽子ビームを FFAG 加速器で供給し、鉛やビスマスの薄膜標的に照射する。生成される 2 つの核分裂片の速度 V_1 と V_2 を測定することにより、運動量の保存則を用いて核分裂片の質量数 A_1 と A_2 は

$$A_1/A_2 = V_2/V_1 \quad (3.17)$$

のように決定される。それぞれの速度は、マイクロチャンネルプレート (MCP: Micro-Channel Plate) を用いた検出器をスタート信号、多芯線比例計数管 (MWPC: Multi-Channel Proportional Counter) をストップ信号とする飛行時間分析によって決定する。図 3-106 のように、MCP1/MWPC1 と MCP4/MWPC4 を使った核分裂片の同時計測、および MCP2/MWPC2 と MCP3/MWPC3 を使った同時計測ができるようにする。

スタート検出器の動作原理を図 3-107 の (a) に示す。核分裂片が薄膜 (0.5 μm のマイラー箔に金を 30 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度つけて導電性を持たせた電極) を通過する際に放出される電子を静電場で MCP に導き、ここで電子増幅を行って信号を取り出す。信号の立ち上がり時間は 2 ns 程度である。ストップ検出器としての MWPC は、図 3-107 の (b) に示すような構造のガス検出器である。カソード面と両側に張ったワイヤー面との間 (5 mm 程度) に電圧 (400 V 程度) を印加する。動作ガスの圧力を高々 2 Torr 程度とすることで、立ち上がりの速いパルス (3~4 ns 程度) が得られる。カソードとアノード間に付与された電子数にほぼ比例した波高のパルスが得られるため、パルスの電荷量を計測することで核分裂片と他の軽荷電粒子を区別できる。さらに、アノードのうち、電荷が集まったワイヤーをディレイライン方式で読み取ることで、核分裂片の入射位置 (X および

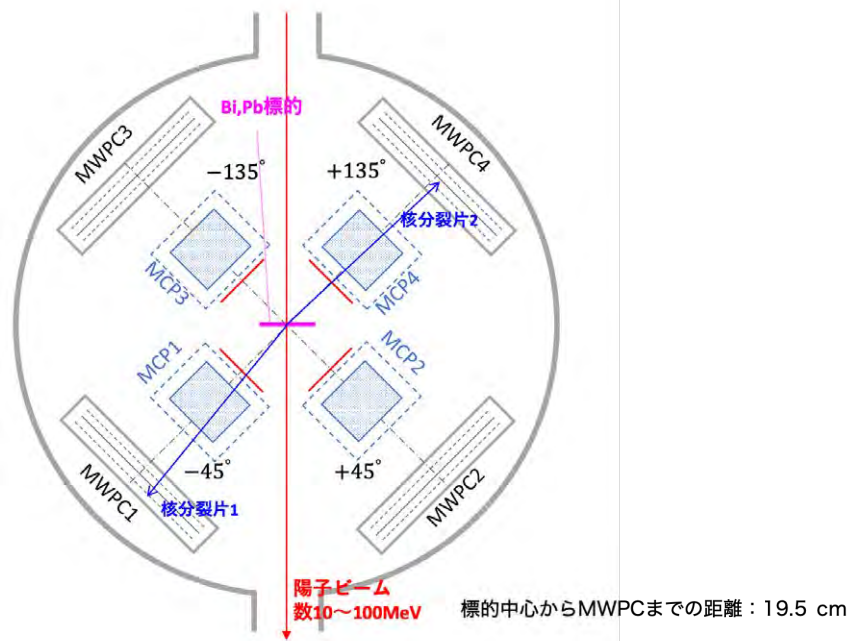


図 3-106 核分裂片質量数分布を測定する実験セットアップの概略図（2つの核分裂片の速度を飛行時間分析で決定する。MCP はマイクロチャンネルプレートを用いたスタートタイミング検出器（令和 3 年度製作）、MWPC は多芯線比例計数管（令和 2 年度製作）を表す）

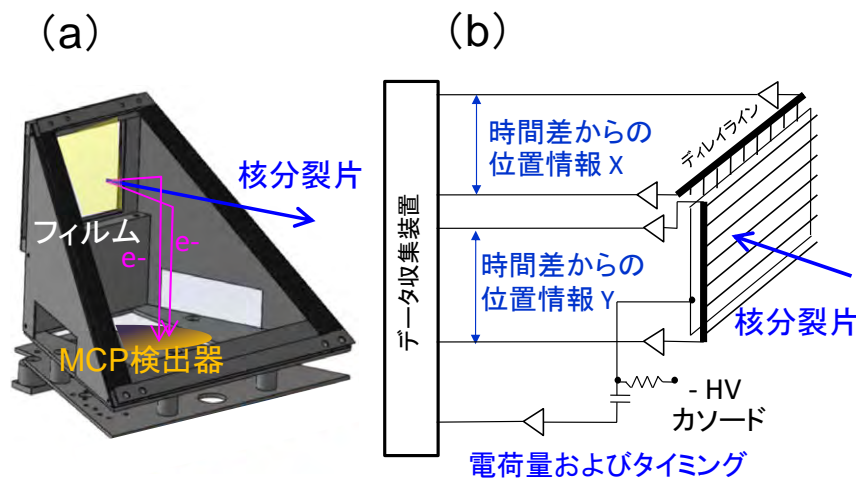


図 3-107 (a) MCP を用いたスタートタイミング検出器および (b) MWPC の動作原理図

Y 座標) を記録することができる。この情報は核分裂の飛行方向を同定するのに使う。特に、イオン入射核分裂では、核分裂片の速度を重心系に変換する必要があるが、この速度ベクトルを知るのに必要となる。また、MWPC への入射位置に応じて飛行距離が変わるが、この飛行距離を補正するのもにも使う。本検出システムの MCP を用いたスタート検出器および MWPC は入射した核分裂片に対して 100% の効率で検出できる。

図 3-106 に示すように、スタート検出器の薄膜は標的位置から 25 mm 程度とした。MWPC の中心カソードまでの距離は 22 mm を標準とし、この場合の立体角は 0.40 sr とした。さらに、MWPC までの距離を 170 mm から 275 mm の範囲で変化させられるものとし、これに対応して立体角は 0.26-0.67 sr となる。MCP として直径 40 mm サイズを選ぶことで、いずれの飛行距離でも MWPC

の全有感面積を遮らない設計とした。図 3-106 から、真空チェンバの直径は 600 mm が最適と判断し、真空チェンバの設計に反映した。

DDX 測定用および核分裂実験用に製作した真空チェンバは、3.1.1(5) 節の図 3-31 に示すように設計され、FFAG 加速器のビームライン高さ 1,200 mm に核分裂反応中心を合わせている。ターゲットホルダは、直径 40 mm の薄膜標的およびビームモニタを、最大 4 個まで取り付けられる設計とし、真空チェンバの下部から高さを遠隔操作で調整できるようにした。また、薄膜標的の直径は、FFAG 加速器からの陽子ビームのサイズに合わせて 48 mm とした。

表 3-18 に示される条件下で、核分裂片の質量数分布を取得するために必要な測定時間を評価した。この評価では、陽子入射核分裂断面積には評価済み核データライブラリ JENDL-HE/2007 [3-2.4] の評価値を用いた。図 3-108 によれば、100 MeV 陽子に対して、それぞれ 40 mb (鉛標的) および 100 mb (ビスマス標的) である。評価の結果、鉛標的の場合、3 時間の測定で 10,000 のイベントが見込まれ、質量数分布を描くことができることがわかった。表の条件から、最大ピーク電流は 333 μA となり、ピーク時における計数率は 76.5 kHz に相当すると見込まれるが、速いタイミング特性を有する MCP 検出器および MWPC を用いる本セットアップで測定可能である。

表 3-18 核分裂片分布の測定時間見積りのための計算条件

| | |
|--|------------------------------|
| 1 台の MWPC の幾何学的な検出効率 | 0.0645 |
| 陽子ビームの電流 (1 秒平均) | 1 nA |
| ビーム幅 | 100 ns |
| 繰り返し | 30 Hz |
| ^{208}Pb の薄膜標的厚さ | 10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ |
| 107 MeV 陽子に対する ^{208}Pb の核分裂断面積 | 40 mb [3-2.5] |

(2) データ収集装置の開発【R1】

データ処理システムとして、高速・高分解能アナログデジタルコンバータ (ADC: Analog-to-Digital Converter) を採用した波形解析システムを導入し、FPGA 方式による信号のリアルタイム解析を行うことで、タイミングの取得およびパルスの電荷量を取得できるようにした。システム共通のクロック信号が内蔵されており、それぞれの検出器から異なる入力チャンネルに信号が入ったとしても、タイムスタンプ情報を基に、オフラインでコインシデンス条件を課すことができる (1 ns 分解能)。また、飛行時間分析のため、より高い精度で時間を記録できるようビットが割り当てられており、最大時間分解能として 3.90 ns に到達できるシステムとした (1 GHz サンプリング周波数)。図 3-107 の (a) に示されるスタート検出器を構成する MCP 検出器で得られる信号は 1 台あたり 1 パルスである。一方、図 3-107 の (b) に示される 1 台の MWPC からは、カソード信号 (タイミングと電荷用) と、位置 (X,Y) を読み取るためのアノード信号が 4 本必要となる。このうち、飛行時間分析に用いる 4 つの MCP 信号と、4 つの MWPC カソード信号の合計 8 台を 1 GHz モジュールに入力し、MWPC の位置 (X,Y) を決める合計 16 チャンネルを 500 MHz モジュールに割り当てることにした。まとめると表 3-19 となる。また、データ収集系の外

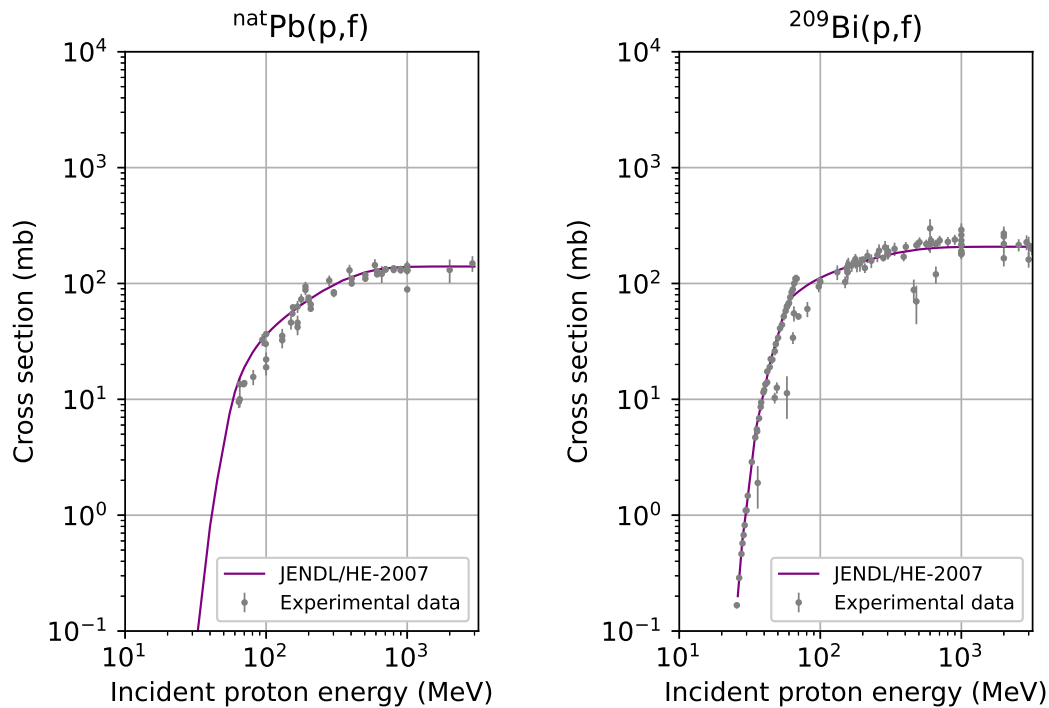


図 3-108 陽子入射 ^{nat}Pb 核分裂断面積（左）および陽子入射 ^{209}Bi 核分裂断面積（右）

観図を図 3-109 に示す。

表 3-19 必要となる入力チャンネル数

| サンプリング 周波数 | 入力信号 波高分解能 | 時間 分解能 | MCP 信号数 | MWPC 信号数 |
|---------------|---------------|-----------|------------|--------------|
| 1 GHz | 14 bit | 3.906 ps | 4 | 4 (カソード) |
| 500 MHz | 14 bit | 7.812 ps | 0 | 16 (アノードワイヤ) |

データ収集装置の性能を評価するため、エネルギー分解能とタイミング特性に関する性能試験を行った。その内容と結果を以下に示す。

a. 時間分解能試験

FFAG 加速器を用いた実験では、核分裂片の飛行時間分析を行うため、目的を達成できる分解能を有する必要がある。データ収集装置本体は、1 GHz モジュールでは 3.906 ps、500 MHz モジュールでは 7.812 ps と十分な性能を有している。ここでは、高速のタイミング信号が得られるセリウム添加臭化ランタン ($\text{LaBr}_3(\text{Ce})$: Cerium-doped Lanthanum Bromide) シンチレーション検出器を用いた時間分解能試験を行った。

試験のセットアップを図 3-110 に示す。 ^{22}Na 線源から放出される 511 keV のガンマ線を、2 台の $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器を用いて同時に検出し、信号間の時間差スペクトルを計測した。1 GHz モジュール入力の 1 チャンネル (Ch) 目にスタート信号、2~8 チャンネル目にストップ信号を順番に入れてゆき、合計 7 つの時間差スペクトルを測定した。同様に、500 MHz モジュー

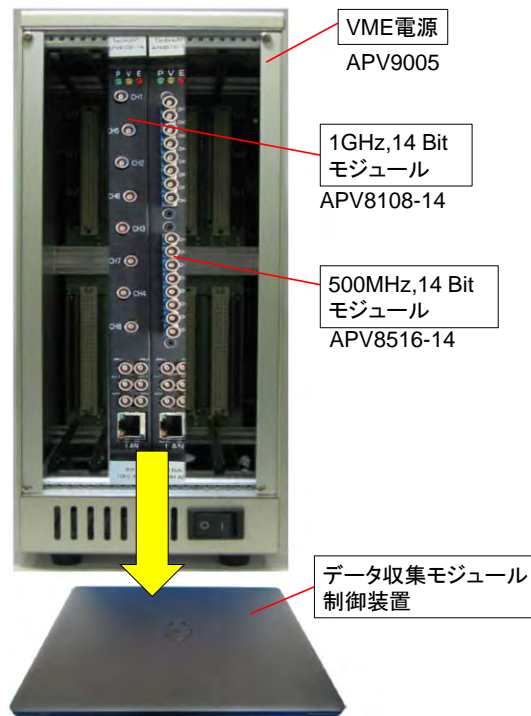


図 3-109 開発したデータ収集装置の外観

ルでは、1チャンネル目をスタート信号、2~16チャンネル目をストップ信号として合計15のスペクトルを得た。測定で得られたスペクトルの例を図3-111に示す。図中の上のパネルは、1GHzモジュールの結果で、Ch2をストップ信号とした例である。下のパネルは、500MHzモジュールで同じくCh2をストップとした例である。このような測定を残りの全チャンネルに対して測定を行った。結果を表3-20に示す。いずれも半値幅で250psより優れている。実際に開発するMCPおよびMWPCは、LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器に比べて立ち上がり時間が速いので、同程度またはこれより優れた分解能が見込まれる。

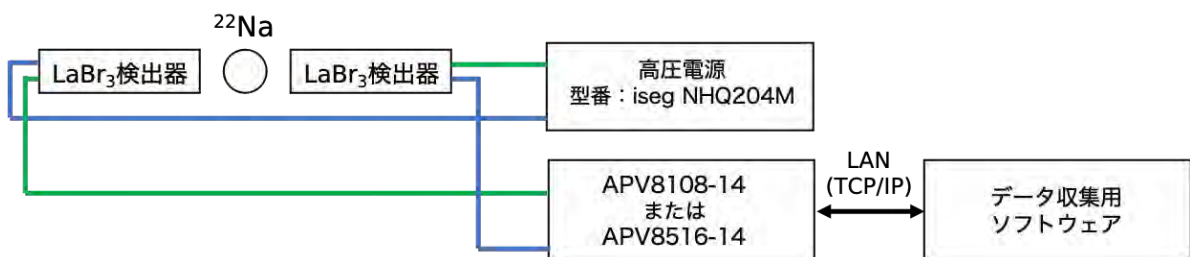


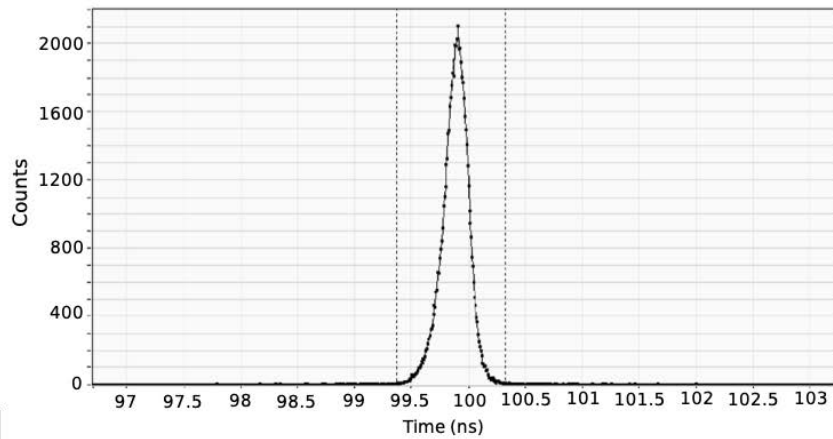
図 3-110 時間分解能測定セットアップ

ここで、 $p + {}^{208}\text{Pb}$ で生成される原子核 ${}^{209}\text{Bi}$ の核分裂を例にとり、核分裂片の質量数を決定する精度を見積もった。質量非対称度 R 、すなわち重い核分裂片 A_H と軽い核分裂片 A_L の比

$$R = A_H/A_L = V_L/V_H \quad (3.18)$$

の分解能を考察する。ここで、 V_H と V_L は、重い核分裂片と軽い核分裂片の飛行速度である。非対称度 R の不確かさ ΔR は、核分裂片の速度を決定する分解能 (ΔV_H と ΔV_L) を用いて、以下

1 GHzモジュール, Ch1 Start – Ch2 Stop



500MHz モジュール, Ch1 Start – Ch2 Stop

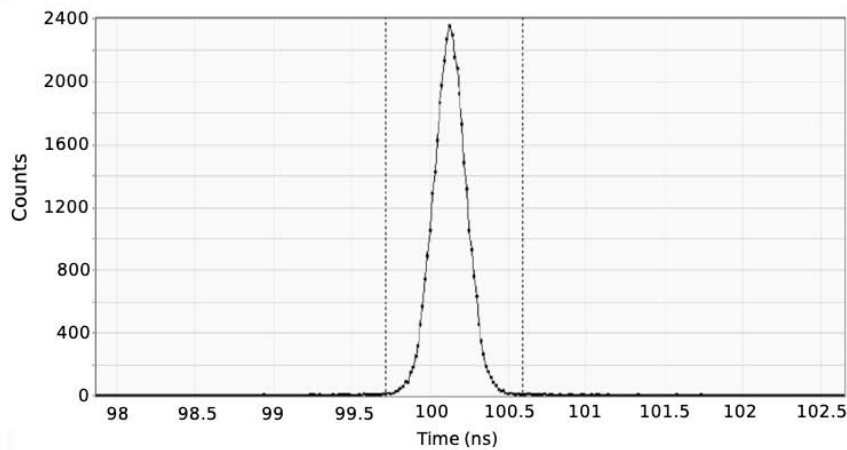


図 3-111 時間差スペクトル (横軸の単位は ns、上が 1 GHz モジュールの結果で、例として Ch1 をスタートとし Ch2 をストップとした結果を示す。下は 500 MHz モジュールで、例として同じく Ch1 をスタートとし、Ch2 をストップとした結果)

のように書ける。

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 = \left(\frac{\Delta V_H}{V_H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_L}{V_L}\right)^2 \quad (3.19)$$

あるいは、飛行時間 T_H と T_L の分解能 (ΔT_H と ΔT_L) を用いると、以下となる。

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 = \left(\frac{\Delta T_H}{T_H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_L}{T_L}\right)^2 \quad (3.20)$$

^{209}Bi の核分裂における核分裂片の全運動エネルギー $\langle E_k \rangle$ は、Viola の系統式 [3-2.6]:

$$\langle E_k \rangle = 0.1189 \frac{Z^2}{A^{1/3}} + 7.3 \quad [\text{MeV}] \quad (3.21)$$

表 3-20 時間分解能 FWHM (ps)

| TOF チャンネル | 1 GHz モジュール | 500 MHz モジュール |
|-------------|-------------|---------------|
| Ch01 - Ch02 | 226.8 | 235.5 |
| Ch01 - Ch03 | 248.3 | 249.2 |
| Ch01 - Ch04 | 247.3 | 237.3 |
| Ch01 - Ch05 | 245.5 | 240.6 |
| Ch01 - Ch06 | 246.1 | 241.4 |
| Ch01 - Ch07 | 245.7 | 244.7 |
| Ch01 - Ch08 | 247.6 | 241.7 |
| Ch01 - Ch09 | - | 238.5 |
| Ch01 - Ch10 | - | 244.9 |
| Ch01 - Ch11 | - | 240.1 |
| Ch01 - Ch12 | - | 247.5 |
| Ch01 - Ch13 | - | 239.6 |
| Ch01 - Ch14 | - | 242.5 |
| Ch01 - Ch15 | - | 242.2 |
| Ch01 - Ch16 | - | 237.7 |

から 145.3 MeV と見積もられる。質量対称核分裂の場合、運動エネルギーは $E_L = E_H = 72.7$ MeV となる。これと図 3-106 より核分裂片の飛行距離（標的中心から MWPC までの距離）19.5 cm から、 $T_L = T_H = 16.83$ ns を得る。時間分解能 0.25 ns の場合、 $\Delta R/R = 0.0210$ となる。これは、対称核分裂における質量分解能として統一原子質量単位（記号 u）で表すと 2 u となり、十分な精度である。

b. エネルギー分解能試験

本データ収集系は、主にタイミング測定を目的として開発されたが、実際の核分裂測定では陽子ビームと標的との反応で核分裂片とともに軽荷電粒子が放出され、これらが MWPC に入る。核分裂片は軽荷電粒子よりもカソードとアノードの間でより多くのエネルギーを付与するため、これに伴って生成される一次電子の数も多く、信号として取り出すことのできる電荷量が多くなる。そのため、MWPC カソードに誘起される電荷量の差を利用して軽荷電粒子と核分裂片を分離することができる。今回開発したモジュールは、信号パルスの電荷を積分できる機能を持ち、エネルギー分解能として 30% あれば目的を達成できる。ここでは、テストとして ^{137}Cs 線源から得られる 662 keV のガンマ線を $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器で測定し、この光電ピークからエネルギー分解能を調査した。測定したセットアップを図 3-112 に示し、パルス波高スペクトルの例を図 3-113 に示す。さらに、2つのモジュールの各チャンネルごとに得られた分解能を表 3-21 に示す。すべてのチャンネルに対して、3.3% 未満の優れたエネルギー分解能が得られており、目標とするエネルギー分解能を十分達成していることがわかった。



図 3-112 エネルギー分解能測定セットアップ

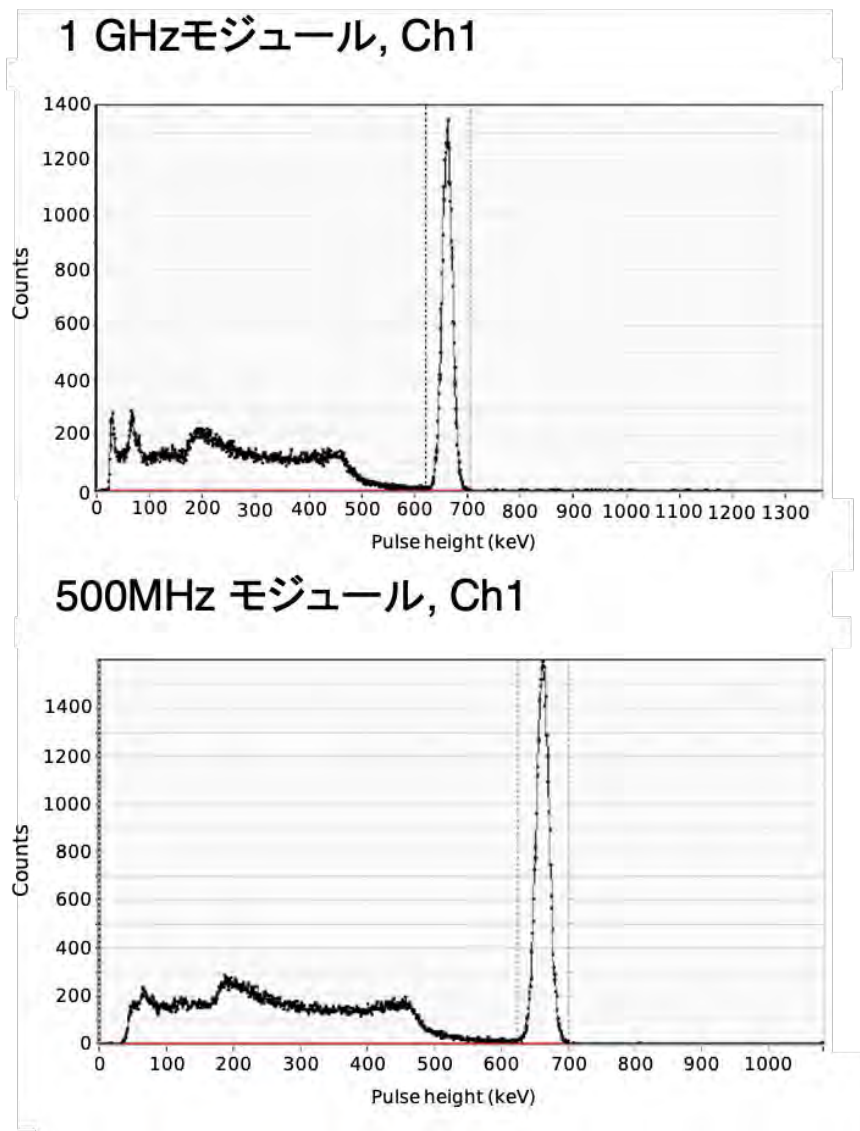


図 3-113 パルス波高スペクトル（横軸の単位は keV、上は 1 GHz モジュールの結果で、例として Ch1 で得たもの。下は 500 MHz モジュールの結果で、例として Ch1 で得たもの）

表 3-21 662 keV ガンマ線に対するエネルギー分解能 FWHM (%)

| チャンネル | 1 GHz モジュール | 500 MHz モジュール |
|-------|-------------|---------------|
| Ch01 | 3.28 | 3.29 |
| Ch02 | 3.24 | 3.28 |
| Ch03 | 3.26 | 3.29 |
| Ch04 | 3.29 | 3.28 |
| Ch05 | 3.27 | 3.28 |
| Ch06 | 3.18 | 3.29 |
| Ch07 | 3.22 | 3.26 |
| Ch08 | 3.24 | 3.25 |
| Ch09 | – | 3.27 |
| Ch10 | – | 3.28 |
| Ch11 | – | 3.28 |
| Ch12 | – | 3.29 |
| Ch13 | – | 3.23 |
| Ch14 | – | 3.24 |
| Ch15 | – | 3.29 |
| Ch16 | – | 3.27 |

(3) MWPC の製作【R2】

本研究で製作した MWPC の設計図面を図 3-114 に示し、その写真を図 3-115 に示す。有感面積を 140 mm × 140 mm とし、アノード電極としてタングステンを 2.0 mm ピッチで張る構造とした。これに合わせて、核分裂片の入射位置を決める精度を、X と Y 座標それぞれに対して 2.0 mm とした。代表的な設計値を以下に示す。

- カソードとワイヤー電極の距離：4.0 mm
- カソードの構造：1.2 μm の高分子膜の両面に金を蒸着して導電性を持たせる
- ワイヤー電極：直径 20 μm のタングステン線を 2.0 mm ピッチで張った構造
- 位置読み出しのためのワイヤー間の時間ディレイ：2 ns
- 信号読み出し端子：LEMO 規格

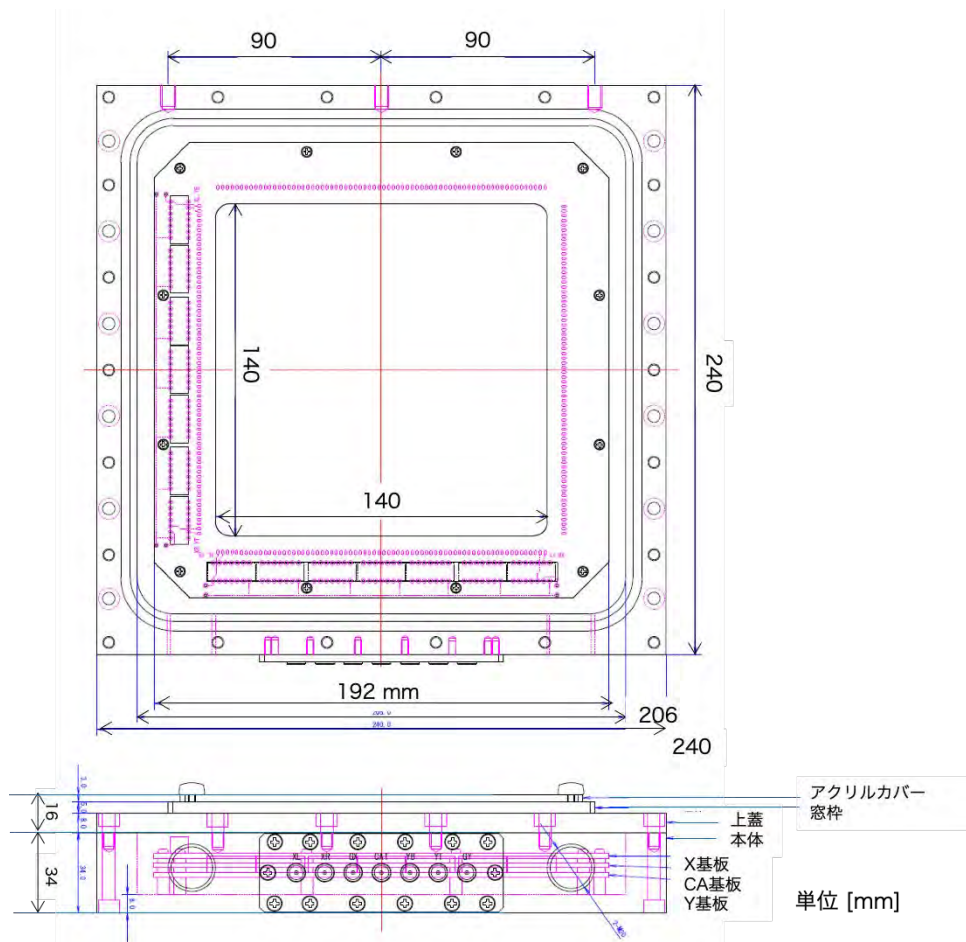


図 3-114 製作した MWPC の設計図面

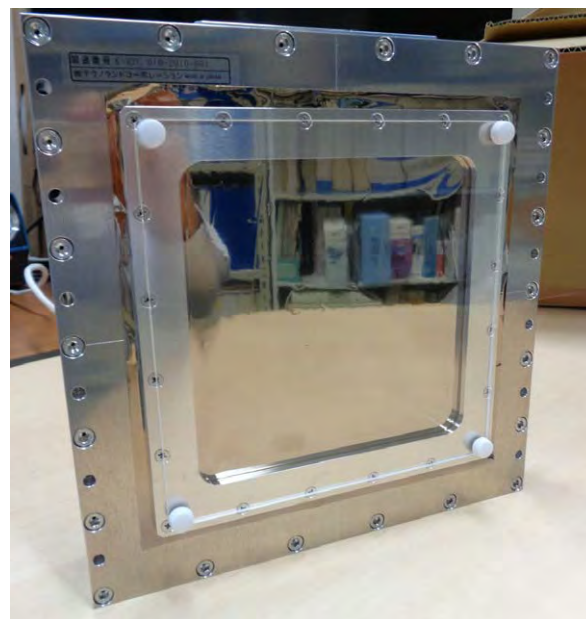


図 3-115 製作した MWPC の写真

(4) MWPC の試験【R2】

原子力機構の原子力科学研究所 タンデム加速器施設において、製作した4台のMWPCのテスト実験を行った。ここで、 ^{248}Cm (半減期 3.48×10^5 年) の自発核分裂片を検出した。キュリウム標的は、約 $300 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ のニッケル箔に約 $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の ^{248}Cm 同位体を電着法によって付けたもので互いに 180° 方向に放出した2つの核分裂片を同時検出できるものである。セットアップを図3-116に示す。4台のうち、MWPC1とMWPC4およびMWPC2とMWPC3のペアで2つの核分裂片の同時計測を行えるようにした。

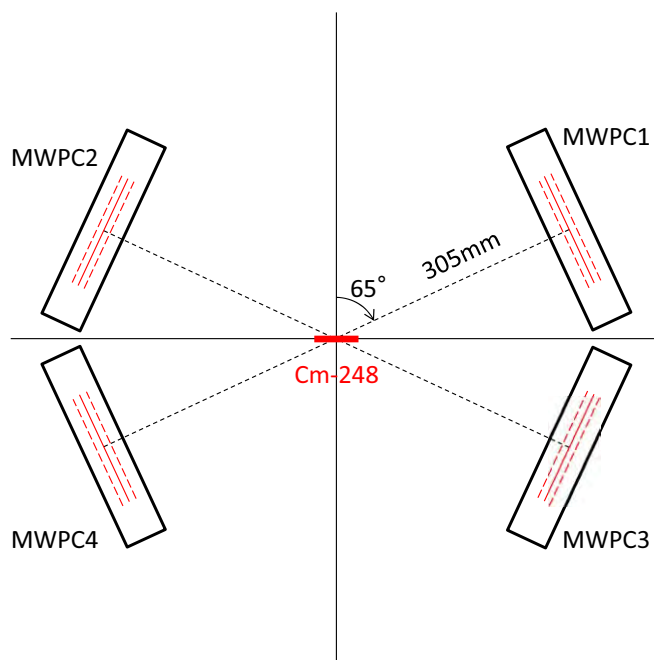


図 3-116 4台のMWPCの試験のセットアップ

図3-117(a)~(d)は、それぞれのMWPCで核分裂片を記録した際のX座標およびY座標スペクトルおよび(X,Y)の2次元座標上での収率を表す。記録した統計量もあり、2.0 mmのワイヤーピッチ構造はこの時点で十分に見えていないが、実験の目的である飛行時間分析の飛行距離補正の目的としては機能する。図3-118の(a)と(b)は、それぞれMWPC1とMWPC4、およびMWPC2とMWPC3によって同時計測された2つの核分裂片に対して、カソードに誘起された電荷(それぞれQ1とQ4およびQ2とQ3)を記録し、2次元面上にプロットしたものである。チャンネル数は、核分裂片がカソードとワイヤー電極の間で付与したエネルギーにほぼ比例する信号である。これらの2次元分布の図のQ1-Q4平面およびQ2-Q3平面において、核分裂片のパルス波高の分布を塊として捉えられているため、閾値は十分に低いと言える。すなわち、核分裂片がMWPCに入ってから検出効率はほぼ100%であることを確認した。また、図3-118(c)と(d)は、MWPC1とMWPC4、およびMWPC2およびMWPC3のカソード信号間の時間差スペクトルである。スペクトルのふた山構造は、核分裂が大小2つの核分裂片を伴って生じるためである。

以上の試験結果から、令和2年度に製作したMWPCは目的とする機能を有しており、核分裂データの取得が可能であることを判断した。

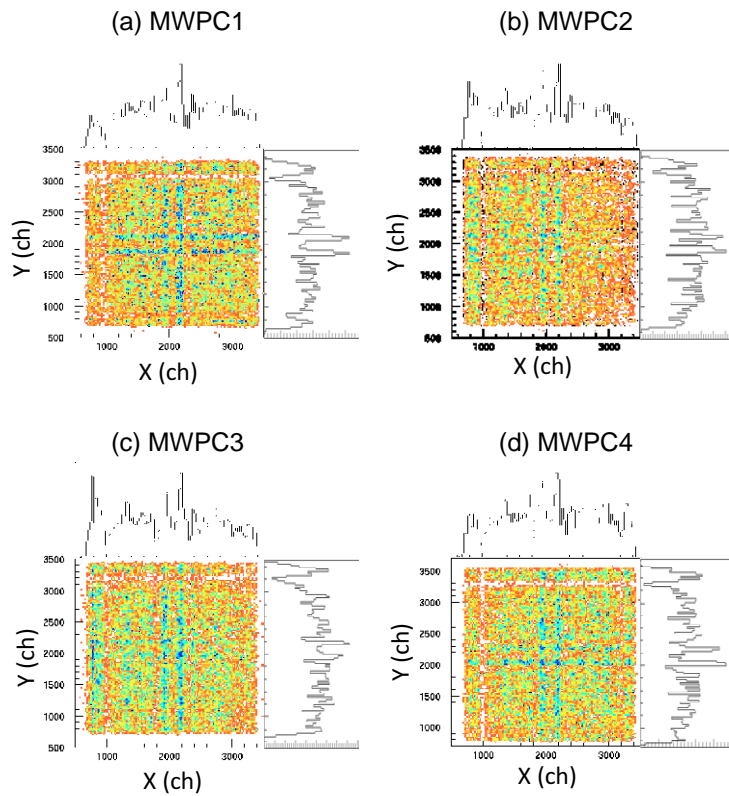


図 3-117 4 台の MWPC によって記録された核分裂片の位置スペクトル

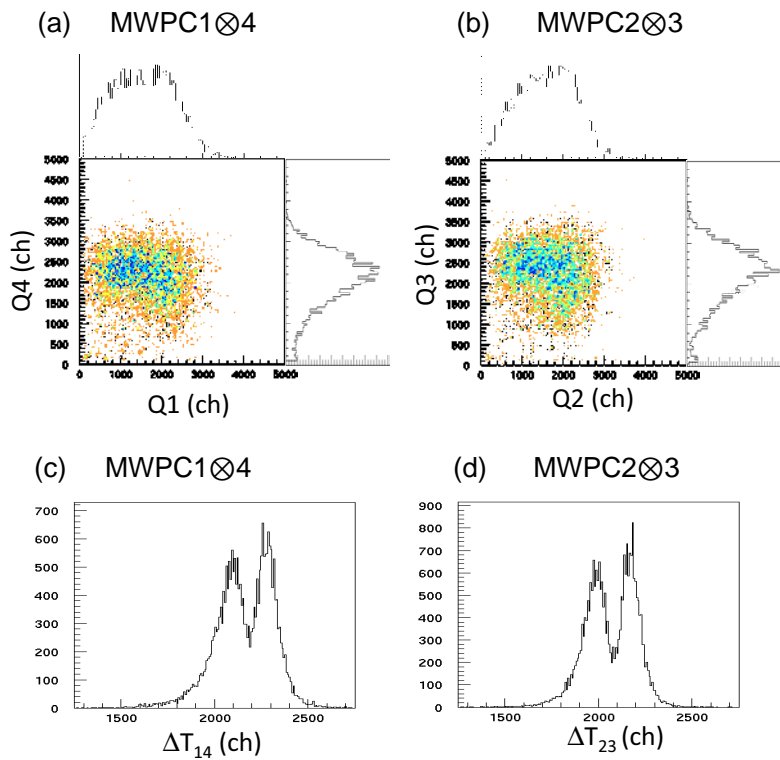


図 3-118 MWPC のカソード電極に誘起された電荷 ((a) および (b)) および 2 台の MWPC 間で得られる核分裂片の TOF スペクトル ((c) と (d))

(5) 核分裂スタートタイミング検出器の製作【R3】

令和3年度に、核分裂片検出器のうちMCPを用いたスタートタイミング検出器の開発を行った。スタートタイミング検出器は図3-119に示されるように、電子放出膜、ミラー電極およびマイクロチャンネルプレートからなる。標的内で発生した核分裂片が電子放出膜を通過する際に、電子が膜から弾き出される。弾き出された電子は、電子放出膜と加速電極の間の電位差によって、ミラー電極に向かって加速される。ミラー電極では電子は下方方向に偏向され、マイクロチャンネルプレートに誘導される。本研究で用いたマイクロチャンネルプレートを図3-120に示す。97 mm × 79 mmの有感領域は多孔質の絶縁体であり、ミラー電極で偏向された電子は、このチャンネル孔で増幅され、電気信号として取り出される。

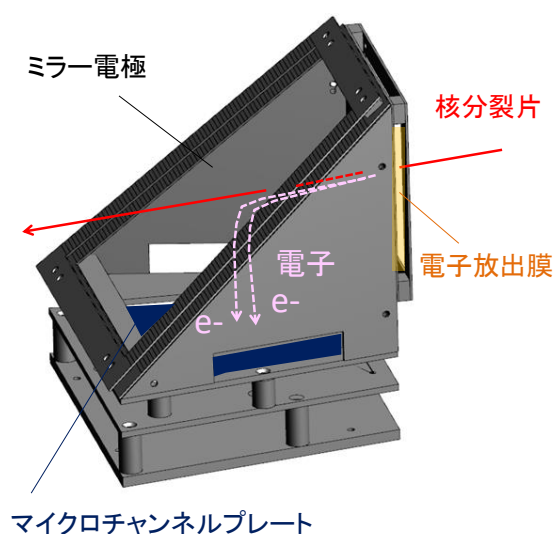


図3-119 製作した核分裂片スタートタイミング検出器（電子放出膜は $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の厚さの金を蒸着した厚さ $0.5 \mu\text{m}$ マイラー箔である）

(6) 核分裂スタートタイミング検出器の試験【R3】

令和3年度に、原子力機構原子力科学研究所のタンデム加速器施設において、 ^{248}Cm （半減期 3.48×10^5 年）自発核分裂線源を用いて、製作した4台のスタートタイミング検出器の試験を実施した。この線源は $300 \mu\text{m}$ 程度の厚さのニッケル薄膜におよそ $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度の厚さの ^{248}Cm を電着したものであり、線源内から互いに反対方向に2つの核分裂片が放出される。図3-121に示すように、製作したスタートタイミング検出器およびMWPCを ^{248}Cm 線源の両側に2対設置し、2つの核分裂片の同時計数測定を行った。

^{248}Cm が核分裂した後の核分裂片の質量を m_1 、 m_2 とする。運動量保存則から、2つの核分裂片の運動量の大きさは等しく、逆向きであるから、運動エネルギーの和（TKE：Total Kinetic

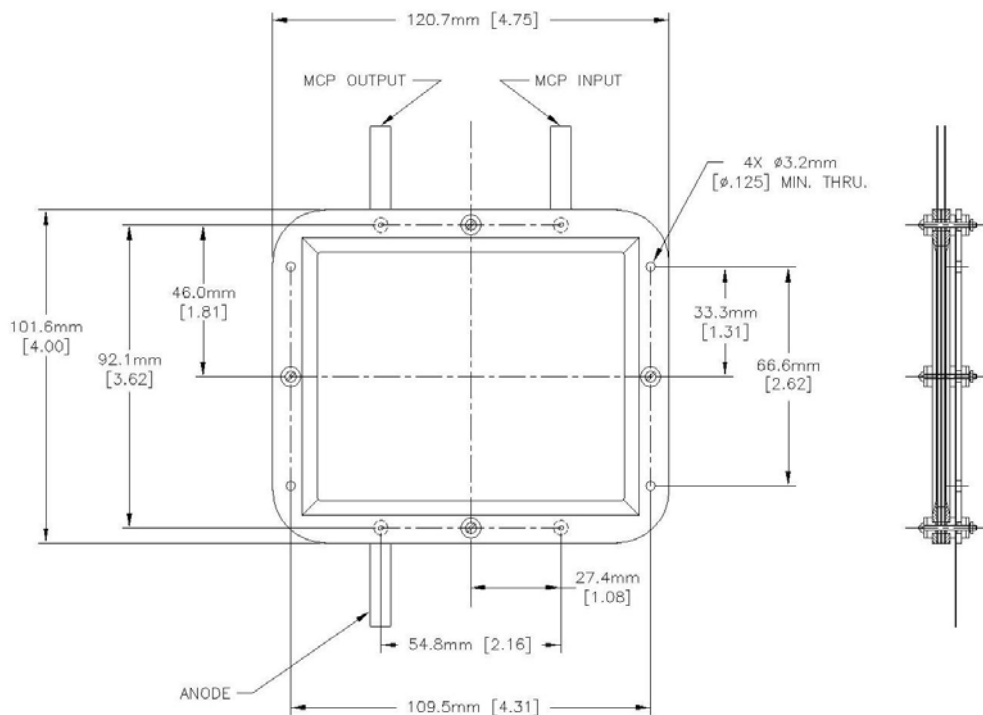


図 3-120 使用したマイクロチャンネルプレートの設計図面（有感領域は縦 97 mm × 横 79 mm、チャンネル径 25 μm 、バイアス角度 $(8 \pm 1)^\circ$ 、ゲイン 1.0×10^6 以上、マイクロチャンネルプレート 2 段で構成される（米国フォトニクスサイエンティフィック社製、型番 32210）

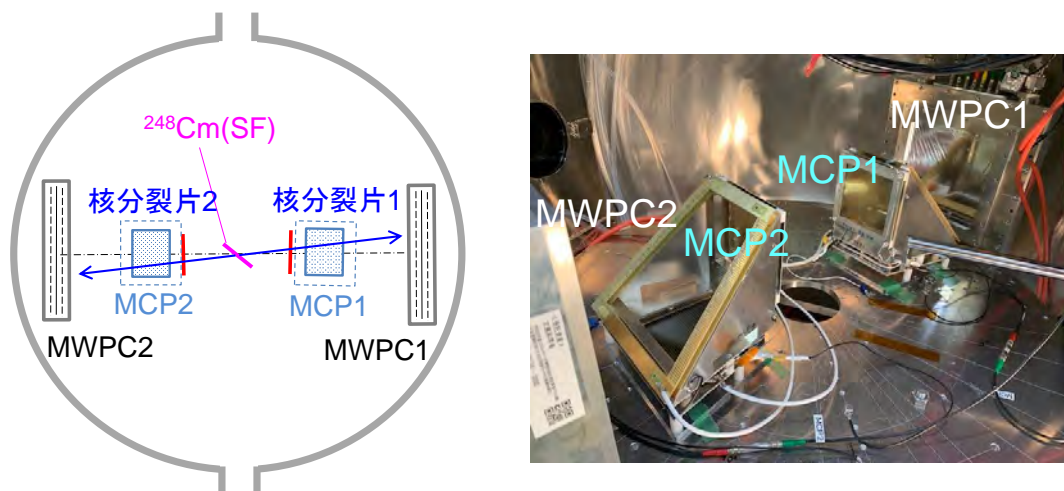


図 3-121 タンデム加速器施設におけるチャンネルプレートスタートタイミングの試験セットアップ（ ^{248}Cm の自発核分裂片を観測し、2つのスタートタイミング検出器の時間差を記録した）

Energy) は次式で表される。

$$\text{TKE} = \frac{p^2}{2m_1} + \frac{p^2}{2m_2} \quad \rightarrow \quad p = \sqrt{\frac{2m_1m_2}{m_1 + m_2} \text{TKE}} \quad (3.22)$$

^{248}Cm の TKE は Viola の系統式 (3.21) から 181.7 MeV と求められる。また、 ^{248}Cm は質量

非対称核分裂（軽い核分裂片と重い核分裂片に分裂する）を示し、質量の平均値は、 $(m_L, m_H) = (108, 140)$ [u] であるから、核分裂片の運動量は $p = 4.5 \times 10^3$ MeV/c、速さは $(v_L, v_H) = (1.35, 1.05)$ [cm/ns] となる。

図 3-122 に 2 台のスタートタイミング検出器からの信号の時間差スペクトルを示す。右側のピークは、軽い核分裂片は MCP1 に、重い核分裂片が MCP2 で同時検出された事象であり、左側のピークはその反対である。ピーク間の時間差はおよそ 4.5 ns である。2 台のスタートタイミング検出器の電子放出膜間の距離は 20 cm 程度であるから、上述の計算から導かれる 4.4 ns と良い一致を示しており、核分裂測定に使用できることを確認できた。

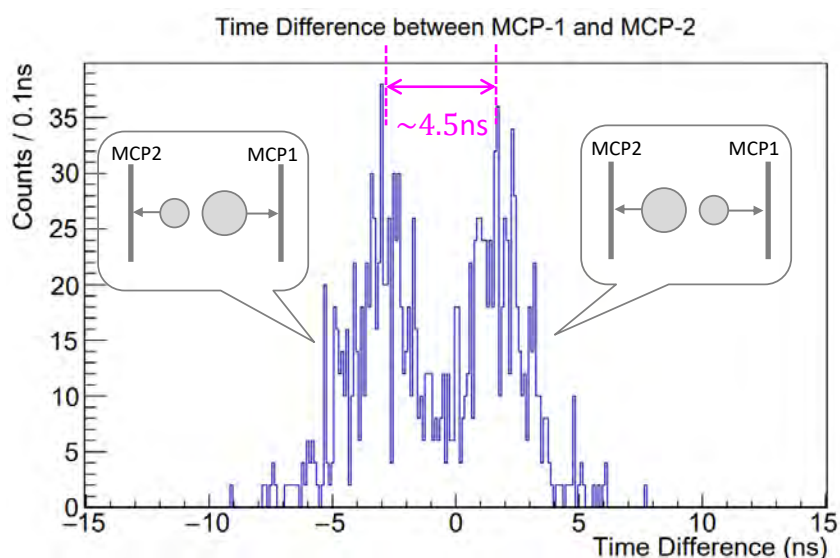


図 3-122 2つのスタートタイミング検出器で得られた ^{248}Cm 自発核分裂片の時間差スペクトル

(7) 鉛標的に対する核分裂片質量数分布測定実験【R3】

令和3年度に、京大複合原子力科学研究所のFFAG加速器施設で鉛標的に対する核分裂質量数分布測定実験を行った。運動エネルギー 107 MeV に加速した陽子ビームを、真空チェンバ内に設置した鉛 (^{208}Pb) 標的に照射した。真空チェンバ内の写真を図 3-123 に示す。ビーム軸（写真では下から上に向かう）から、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 135^\circ$ の方向にスタートタイミング検出器と MWPC のペアを 4 対設置した。核分裂片は反対方向に放出するため、核分裂事象は MCP1-MWPC1-MCP4-MWPC4、または MCP2-MWPC2-MCP3-MWPC3 の同時計数として観測される。

図 3-124 に真空チェンバ内に設置した標的の写真を示す。上から、厚い ^{208}Pb 標的、ビーム位置を確認するための蛍光板（ビームビューワー）、薄い ^{208}Pb 標的、およびビーム電流を確認するためのファラデーカップを設置した。標的は厚さ $0.5 \mu\text{m}$ のマイラー薄膜上に濃縮度 98% の ^{208}Pb を真空蒸着することで作製した。標的ホルダーは直径 40 mm の孔が空いた、厚さ 0.5 mm のステンレス製の板であり、標的部分の周りに蛍光板を貼り付け、ビームが標的を外れて照射されてい

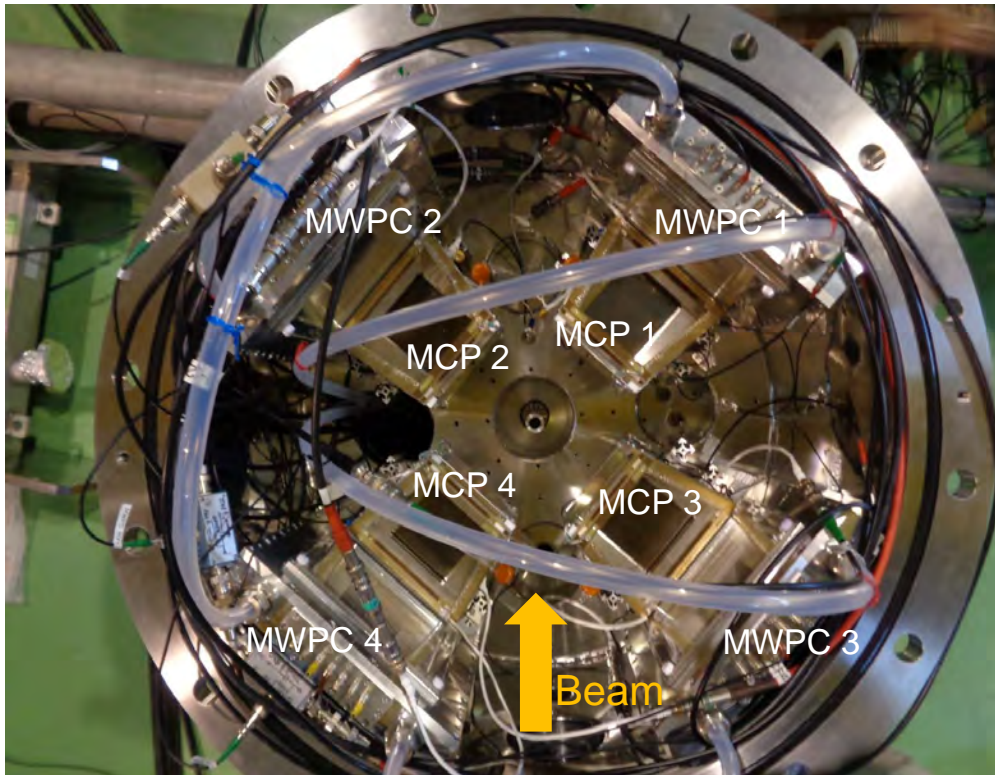


図 3-123 核分裂片質量数分布測定実験のセットアップ (4台のスタートタイミング検出器 (MCP) と、4台の多芯線比例計数管 (MWPC) で構成される。MWPCを動作させるイソブタンガス (2 Torr) を流すチューブが見える)

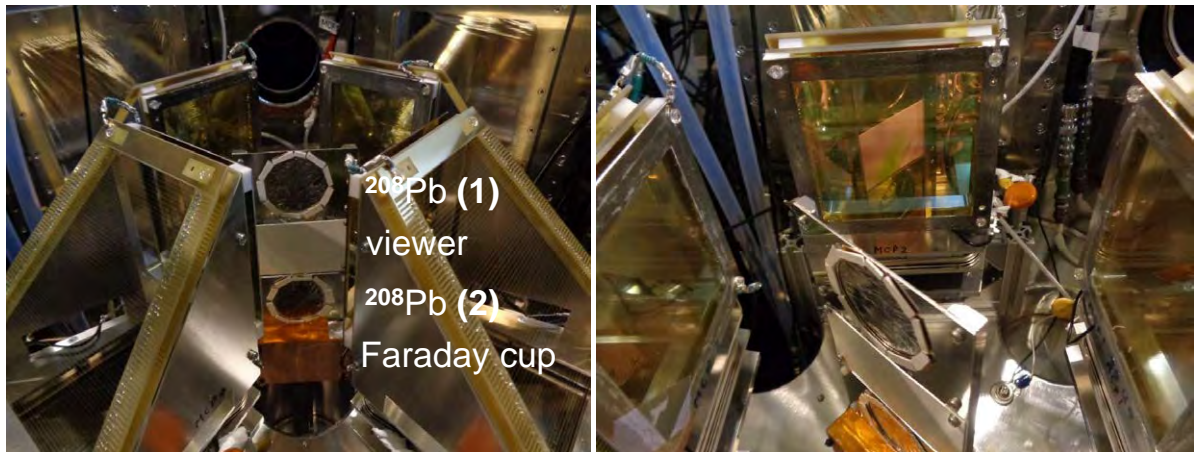


図 3-124 実験セットアップをビーム上流方向から見た図 (左) と斜め上流から見た図 (スタートタイミング検出器の電子放出膜が見える)

ないことを確認できるようにした。 ^{208}Pb 標的 (1) の厚さは $250 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ であり、予備として用意した ^{208}Pb 標的 (2) の厚さは $160 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ である。実際に 107 MeV の陽子ビームをビューワーに照射したときの様子を図 3-125 に示す。ビームスポット (写真では緑色に光っている) の大きさは、およそ縦 20 mm × 横 20 mm であり、標的に対して十分小さいことがわかる。

^{208}Pb 標的に陽子ビームを照射した際の核分裂事象によって観測された MWPC からの信号を図 3-126 に示す。対面する MWPC1 (黄) と MWPC4 (緑) に同時に信号が観測されており、核分

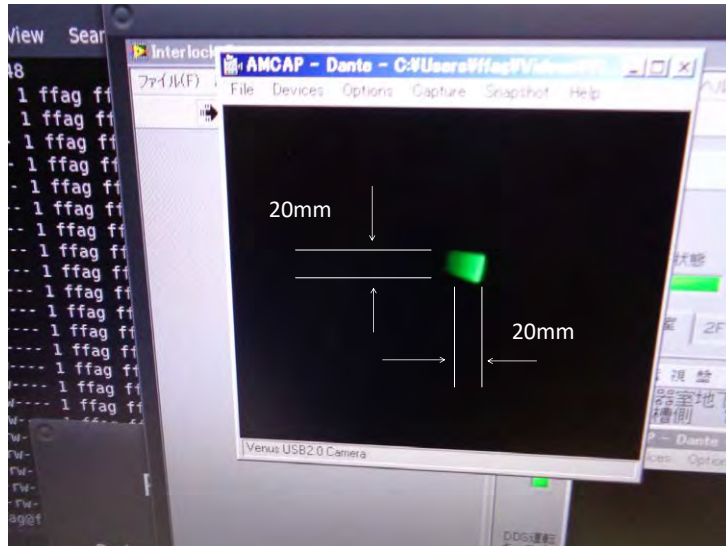


図 3-125 ビームビューワーで見た陽子ビームの形状 (約 20 mm×20 mm で、標的のサイズ (直径 40 mm) より十分に小さい)

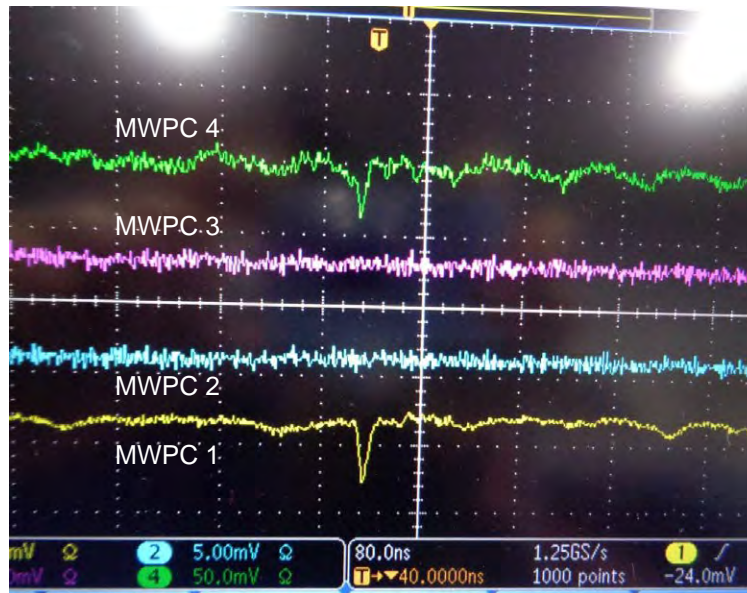


図 3-126 $p + {}^{208}\text{Pb}$ 反応で観測された 4 台の MWPC の信号 (対面する MWPC1 と MWPC4 でパルスが観測された例)

裂事象であることがわかる。ノイズレベルよりも大きな波高値を得られることがわかった。図 3-127 は対面に設置した MWPC2 と MWPC3、また MWPC3 の前に設置した MCP3 の信号の様子である。MWPC2 と MWPC3 で同時計数した核分裂事象では、MCP3 にも信号が見えていることがわかる。

図 3-128 に $p + {}^{208}\text{Pb}$ 反応測定で観測された MWPC2-MWPC3 間の時間差スペクトルを示した。図 3-122 に示した ${}^{248}\text{Cm}$ の自発核分裂のような質量非対称核分裂 (ふた山構造) ではなく、質量対称核分裂 (ひと山構造) であることがわかる。

次に、観測されたふたつの核分裂片間の飛行時間差から核分裂片の質量を導出する。複合核 (質量 M) が 2 つの核分裂片 (質量 m_1 、 m_2) に分裂する場合を考える。質量数を導出する際には、

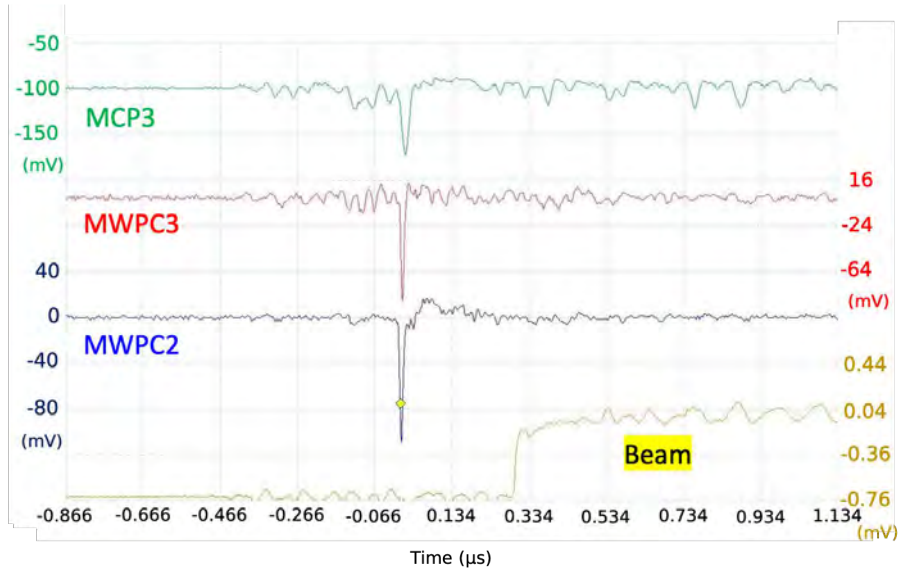


図 3-127 $p + {}^{208}\text{Pb}$ 反応で観測された MWPC2、MWPC3 および MCP3 の信号

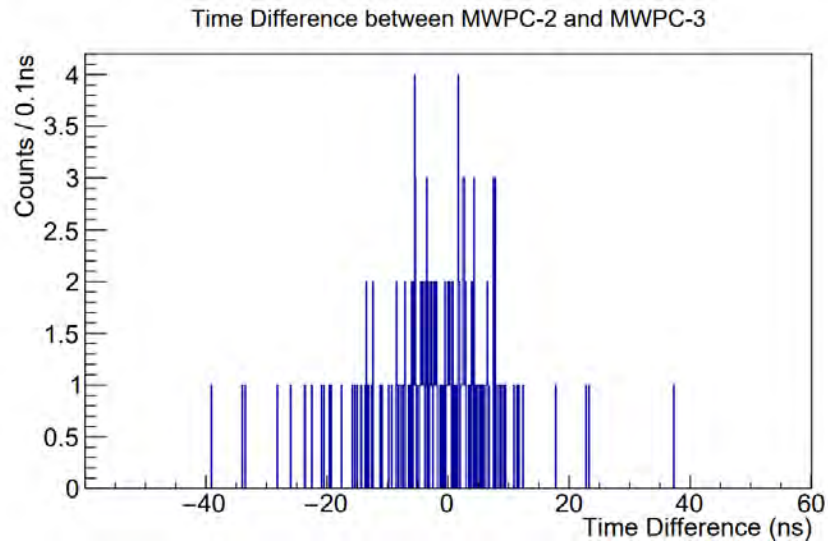


図 3-128 $p + {}^{208}\text{Pb}$ 反応における MWPC2 と MWPC3 の時間差スペクトル

結合エネルギーを無視できるので、 $M \approx m_1 + m_2$ である。運動量保存則から、複合核 ${}^{209}\text{Bi}$ の速度は 0.067 cm/ns 程度であり、前述の核分裂片の速度 ($\sim 1 \text{ cm/ns}$) に比べて非常に小さいことがわかる。そこで入射運動量を無視すれば、 $p_1 \approx p_2$ ($m_1 v_1 \approx m_2 v_2$) である。以上のことから、

$$\text{TKE} = \frac{p_1^2}{2m_1} + \frac{p_2^2}{m_2} \quad (3.23)$$

$$\approx \frac{p_1^2}{2m_1} + \frac{p_1^2}{2m_2} = \frac{m_1 + m_2}{2m_1 m_2} p_1^2 \quad (3.24)$$

$$\approx \frac{M}{2m_1 m_2} p_1^2 = \frac{M m_1}{2m_2} v_1^2 \quad (3.25)$$

を得る。ここで速さ v_1 と v_2 は

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\text{TKE}}{M} \frac{m_2}{m_1}} \quad (3.26)$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\text{TKE}}{M} \frac{m_1}{m_2}} \quad (3.27)$$

で表される。核分裂片の飛行距離をそれぞれ L_1 、 L_2 とすると、飛行時間差 ΔT は、

$$\Delta T = \frac{L_1}{v_1} - \frac{L_2}{v_2} \quad (3.28)$$

$$= L_1 \sqrt{\frac{M}{2\text{TKE}} \frac{m_1}{m_2}} - L_2 \sqrt{\frac{M}{2\text{TKE}} \frac{m_2}{m_1}} \sqrt{\frac{2\text{TKE}}{M}} \Delta T \quad (3.29)$$

$$= L_1 \sqrt{\frac{m_1}{m_2}} - L_2 \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} \quad (3.30)$$

となり、これを解くと

$$\sqrt{\frac{m_2}{m_1}} = \frac{-\Delta T + \sqrt{(\Delta T)^2 + L_1 L_2 (2M/\text{TKE})}}{L_2 \sqrt{2M/\text{TKE}}} \quad (3.31)$$

となる。複合核 ^{209}Bi の TKE は Viola の系統式 (3.21) から 145 MeV、飛行距離は平均値の $L_1 = L_2 \approx 23.05$ cm を代入して求めた核分裂片の質量比から核分裂片の質量数分布を導出すると、図 3-129 のようになる。

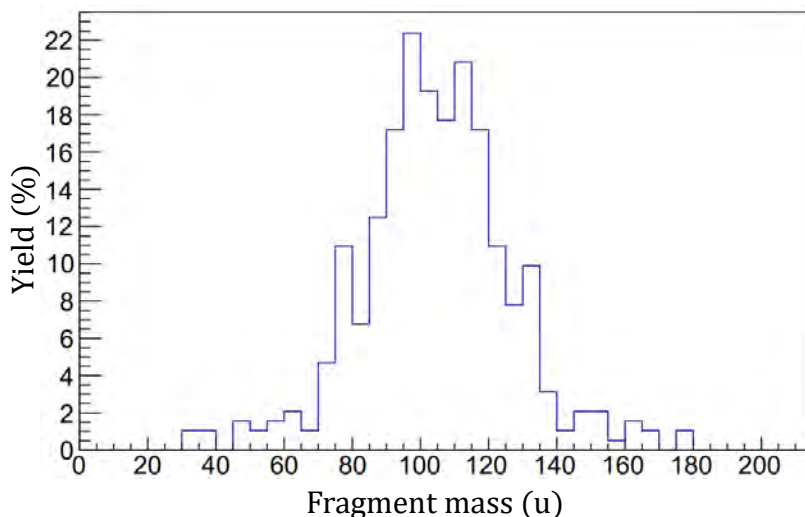


図 3-129 $p + ^{208}\text{Pb}$ 反応を用いて測定した ^{209}Bi の核分裂片質量分布

(8) ビスマス標的に対する核分裂片質量分布測定実験【R4】

令和 4 年度は、令和 3 年度の ^{208}Pb に引き続き ^{209}Bi の陽子入射核分裂における核分裂質量分布の測定を行った。またデータの整合性の確認、および統計精度向上のため、 ^{208}Pb のデータを再取得した。京大複合原子力科学研究所の FFAG 加速器施設にて実験を行った。運動エネルギー

107 MeV に加速した陽子ビームを、真空チェンバ内に設置した標的に照射した。検出器のセットアップは先述のとおりである。 ^{209}Bi と ^{208}Pb 標的の厚さは、それぞれ 193 および $166 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ である。 ^{209}Bi 標的に陽子ビームを照射した際の核分裂事象によって観測された MWPC から信号を図 3-130 に示す。対面する MWPC2 (赤) と MWPC3 (青) に同時に信号が観測されており、

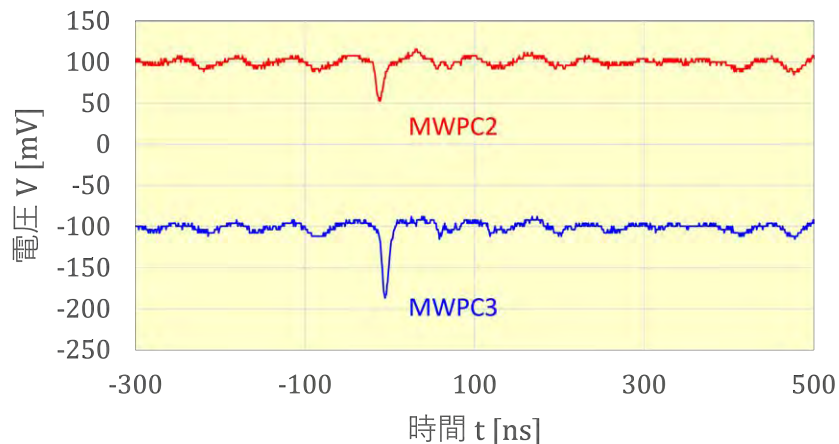


図 3-130 $p + ^{209}\text{Bi}$ 反応で観測した MWPC2-MWPC3 の同時計数事象

核分裂事象であることがわかる。偶発的な同時計数を軽減するため 40 ~ 60 pA のビーム強度で実験を行った。

図 3-131 に $p + ^{209}\text{Bi}$ (左)、 $p + ^{208}\text{Pb}$ (右) 反応測定で観測された MWPC2-MWPC3 間の時間差スペクトルを示す。

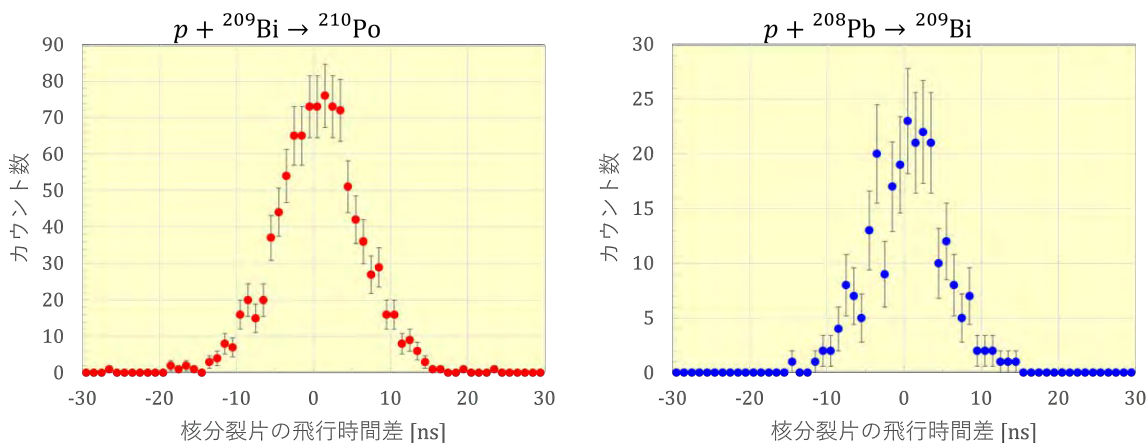


図 3-131 $p + ^{209}\text{Bi}$ 反応 (左) および $p + ^{208}\text{Pb}$ (右) 反応で観測された核分裂片の時間差スペクトル

複合核 ^{210}Po と ^{209}Bi の TKE は、Viola の系統式 (3.21) からそれぞれ 148.4 および 145.3 MeV となる。飛行距離の平均値 $L_1 = L_2 = 162.5 \text{ mm}$ を先述の式に代入すると質量比が得られる。図 3-132 と図 3-133 に、それぞれ本実験で得られた ^{209}Bi および ^{208}Pb の陽子入射核分裂における核分裂質量分布を示す。昨年度取得したデータ (○) と矛盾のない結果が得られていることがわかる。質量数分布の中心値は、 ^{208}Pb および ^{209}Bi に対してともに 105 u となった。

本解析では核分裂する前の原子核を、 $p + {}^{208}\text{Pb}$ 反応では ${}^{209}\text{Bi}$ 、また $p + {}^{209}\text{Bi}$ 反応では ${}^{210}\text{Po}$ と仮定した。本研究で取り扱う高エネルギー核分裂反応では、核子（陽子や中性子）を放出した後核分裂する場合があります。実験的に分裂前の高励起原子核を同定することは非常に難しい。これを克服する実験的な手段として、核分裂片の陽子数・質量数を測定し、分裂前の原子核を同定する方法が考えられる。これは今後の課題である。

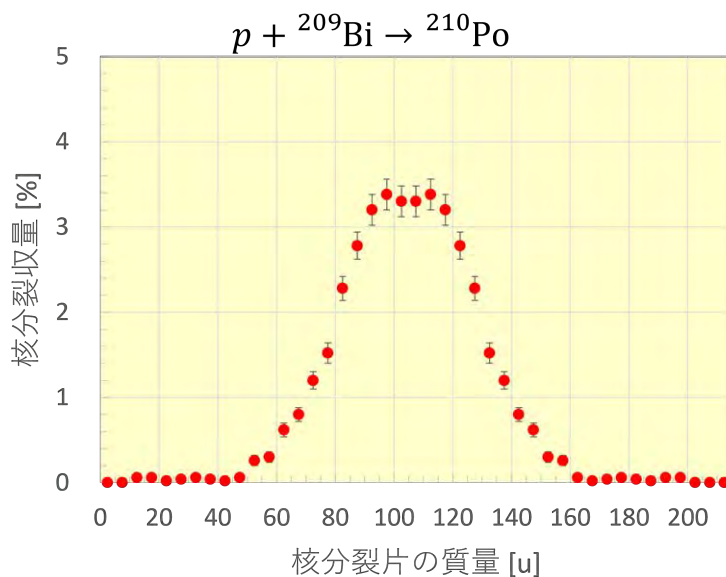


図 3-132 $p + {}^{209}\text{Bi}$ 反応実験で得られた ${}^{210}\text{Po}$ の核分裂質量分布

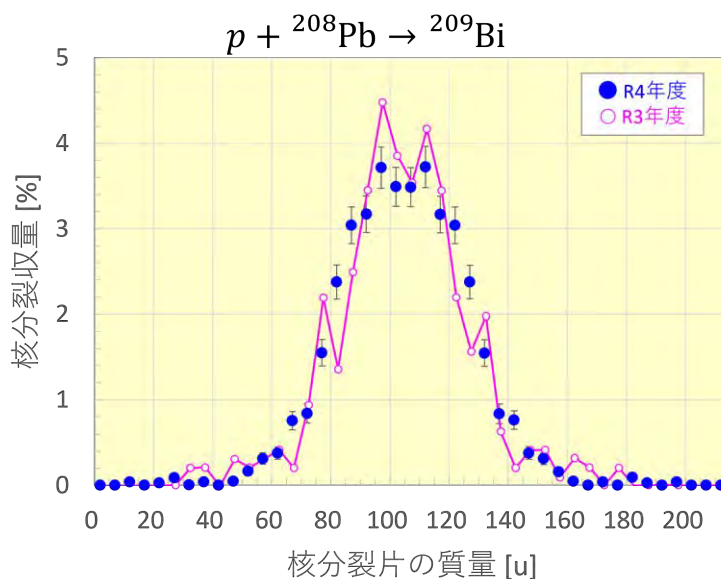


図 3-133 $p + {}^{208}\text{Pb}$ 反応実験で得られた ${}^{209}\text{Bi}$ の核分裂質量分布（青（●）は本年度ピンク（○）は昨年度取得したデータ）

(9) 核反応モデルによる核分裂片質量数分布の解析【R4】

核分裂モデルが組み込まれた核反応モデルによる核分裂片質量数分布の解析を行い、最新の核分裂モデルとの比較検討を行った。核分裂片質量数分布の解析には、PHITS に組み込まれている核内カスケードモデル INCL4.6 と一般化蒸発モデル GEM [3.2-7] を組み合わせた INCL4.6/GEM および核内カスケードモデル INCL++ [3-2.8] と脱励起モデル ABLA07 [3-2.9] を組み合わせた INCL++/ABLA07 を使用した。図 3-134 および図 3-135 に、それぞれ 107 MeV 陽子入射 ^{208}Pb 核分裂片および ^{209}Bi 核分裂片の質量数分布の解析結果を示す。いずれも単一のガウス分布に従い、その分布の中心値は ^{208}Pb で 99 u、 ^{209}Bi で 100 u となった。これはすなわち、核分裂が生じる直前の高励起原子核の質量数の平均値は、 ^{208}Pb で 198 u、 ^{209}Bi で 200 u となり、1 回の核反応で核分裂が生じるまでに、核内カスケード成分と蒸発成分を合わせて平均 9~10 個の核子が放出されることを意味する。

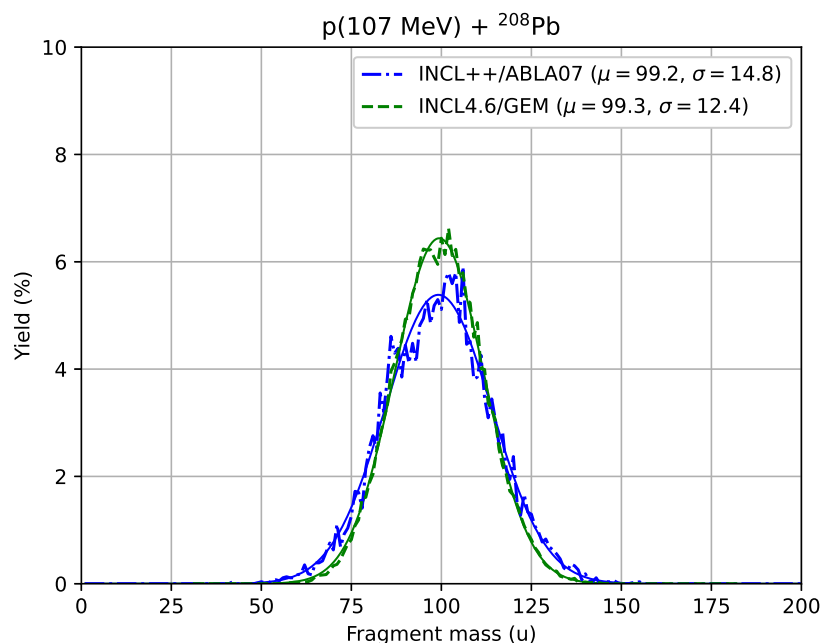


図 3-134 107 MeV 陽子入射 ^{208}Pb 核反応における核分裂片質量数分布の核反応モデルによる解析値

図 3-136 に、107 MeV 陽子入射 ^{208}Pb 核分裂片および ^{209}Bi 核分裂片の電荷（陽子数）分布の解析結果を示す。質量数分布と同様、陽子数分布も単一のガウス分布に従い、その分布の中心値は ^{208}Pb で 41.4 個、 ^{209}Bi で 41.9 個となった。したがって、核分裂が生じる直前の高励起原子核の陽子数の平均値は、 ^{208}Pb で 83 個、 ^{209}Bi で 84 個となり、核分裂が生じるまでに放出される陽子の数は、中性子に比べて無視できる。すなわち、1 回の核反応で核分裂が生じるまでに放出される中性子は平均で 8~9 個と推定される。

実験値と核反応モデルによる核分裂片質量数分布の幅を考察するため、理論計算で得られた分布のピーク位置が実験と同一になるように補正し、補正された分布と実験値との比較を行った。図 3-137 および図 3-138 にその結果を示す。核反応モデルによる質量数分布の幅は、INCL4.6/GEM

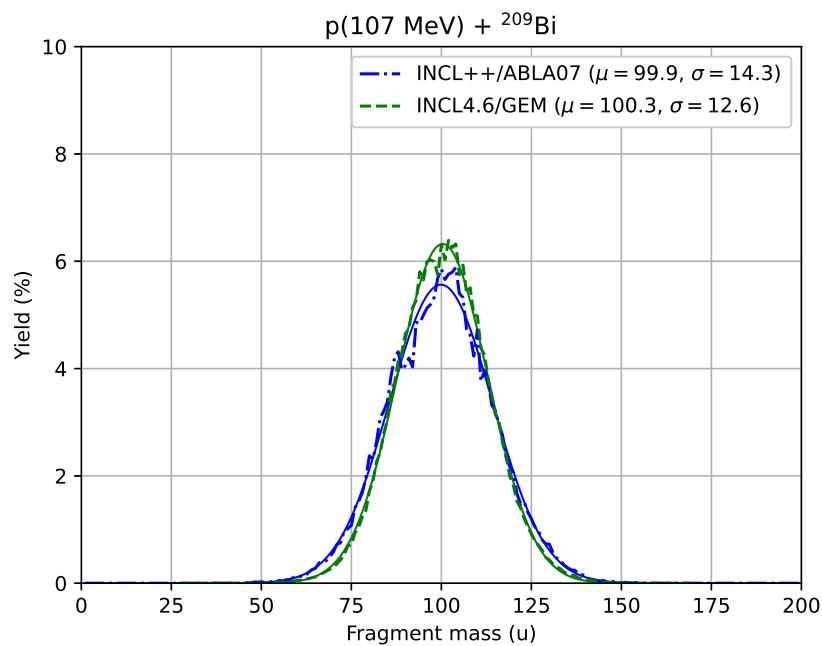


図 3-135 107 MeV 陽子入射 ^{209}Bi 反応における核分裂片質量数分布の核反応モデルによる解析値

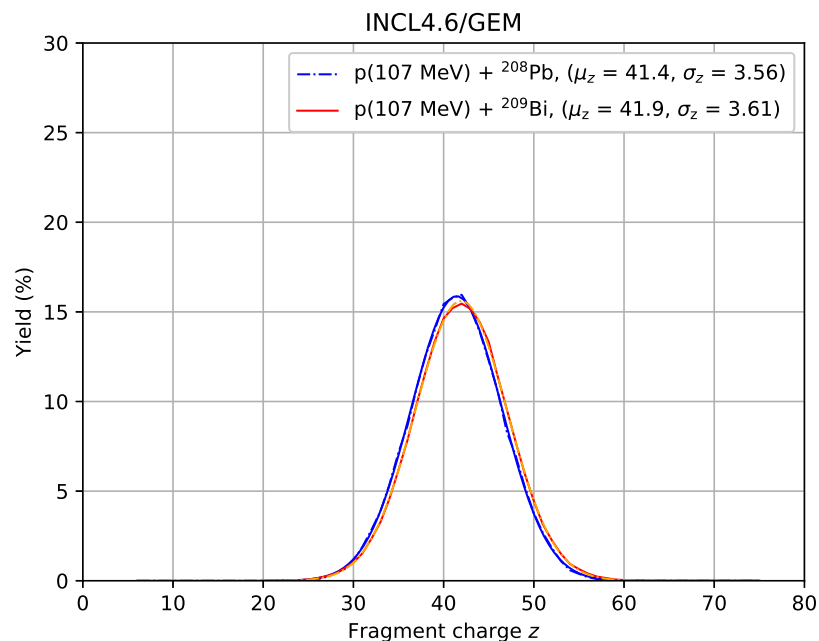


図 3-136 107 MeV 陽子入射 ^{208}Pb 反応および 107 MeV 陽子入射 ^{209}Bi 反応における核分裂片電荷分布の核反応モデルによる解析値

と INCL++/ABLA07 とともに実験値よりも小さくなった。

核分裂片質量数分布の幅は、核分裂を起こす直前の高励起原子核の種類と励起エネルギーに固有のパラメータと考えられている。GEM による核分裂片放出の計算では、質量数分布の幅 σ_M [u]

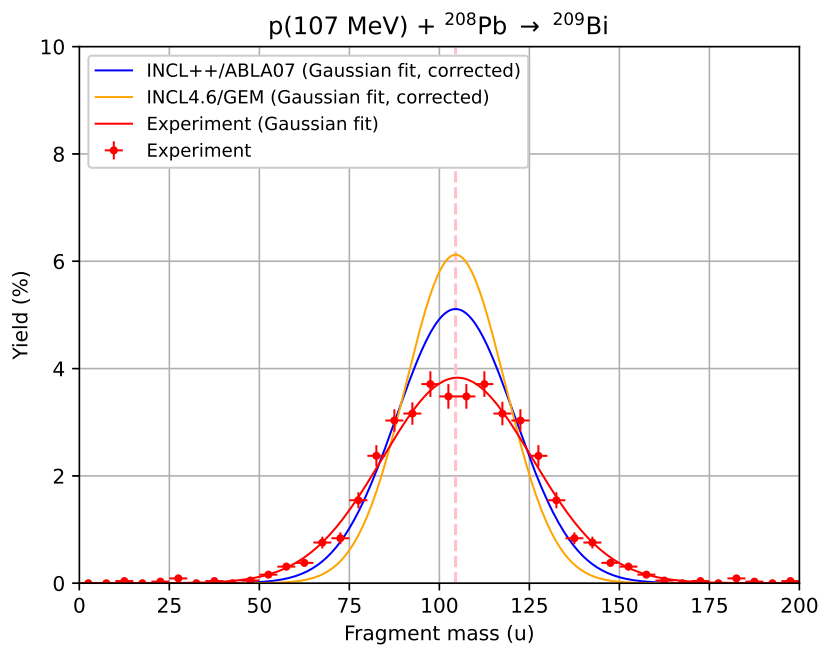


図 3-137 $p + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{209}\text{Bi}$ 反応における核分裂片質量数分布の理論モデルによる解析値（補正值）と実験値との比較

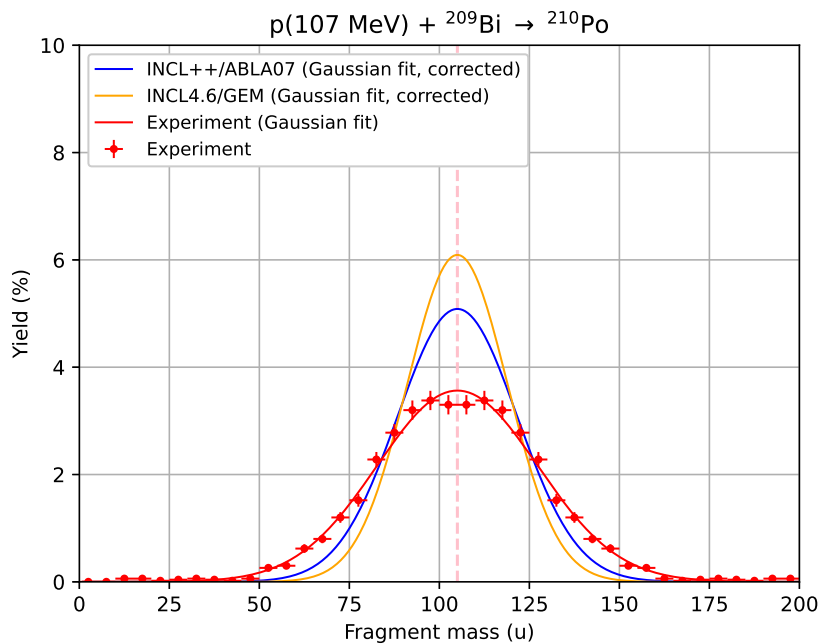


図 3-138 $p + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Po}$ 反応における核分裂片質量数分布の理論モデルによる解析値（補正值）と実験値との比較

が次の系統式に従うように、核分裂片の質量数がサンプリングされる。

$$\sigma_M [\text{u}] = C_1 X^2 + C_2 X + C_3 (E - B_f) + C_4 \quad (3.32)$$

ここで、 $X (= Z^2/A^{1/3})$ 、 E および B_f は、それぞれ高励起原子核（複合核）の核分裂性を表すパラメータ（fissility parameter）、励起エネルギーおよび核分裂障壁（単位：MeV）を表す。 C_1 、 C_2 、 C_3 および C_4 は調整パラメータであり、現行モデルでは $C_1 = 0.122$ 、 $C_2 = -7.77$ 、 $C_3 = 3.32 \times 10^{-2}$ および $C_4 = 134.0$ が設定されている。核反応モデルの高度化では、これらの調整パラメータとともに核分裂片が生じる直前の高励起原子核の質量数と励起エネルギーを調査する必要があり、これは今後の課題である。課題克服の可能性については 3.3 節に示す

参考文献

- [3-2.1] 令和元年度 文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 原子力システム研究開発事業
「FFAG 陽子加速器を用いた ADS 用核データの実験的研究」成果報告書（令和 2 年 3 月、日
本原子力研究開発機構）
- [3-2.2] 令和 2 年度 文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 原子力システム研究開発事業
「FFAG 陽子加速器を用いた ADS 用核データの実験的研究」成果報告書（令和 3 年 3 月、日
本原子力研究開発機構）
- [3-2.3] 令和 3 年度 文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 原子力システム研究開発事業
「FFAG 陽子加速器を用いた ADS 用核データの実験的研究」成果報告書（令和 4 年 3 月、日
本原子力研究開発機構）
- [3-2.4] Watanabe Y, Kosako K, Kunieda S, et al., “Status of JENDL high energy file.”, J.
Korean Phys. Soc., vol.59, no.2, 2011, pp.1040–1045
- [3-2.5] Iwamoto H and Meigo S, “Unified description of the fission probability for highly excited
nuclei.” J. Nucl. Sci. Technol., vol.56, no.2, 2019, pp.160–171,
- [3-2.6] Viola VE, Kwiatkowski K, and Walker M, “Systematics of fission fragment total kinetic
energy release.” Phys. Rev. C, vol.31, 1985, pp.1550.
- [3.2.7] Furihata S, Statistical Analysis of Light Fragment Production from Medium Energy
Proton-induced Reactions, Nucl. Instr. Methods Phys. Res. B, vol.171, 2000, pp.251–258.
- [3-2.8] Leray S, Mancusi D, Kaitaiemi P, et al., Extension of the Liège Intra Nuclear Cascade
model to light ion-induced collisions for medical and space applications, J Phys: Conf Series
2013;420:012065.
- [3-2.9] Kelic A, Ricciardi MV, Schmidt K-H, Proceedings of the Joint ICTP-IAEA Advanced
Workshop on Model Codes for Spallation Reactions, ICTP Trieste, Italy, 4-8 February 2008,
D. Filges et al., Eds., IAEA INDC(NDS)-530, Vienna (2008) 181.

3.3 高励起状態の核分裂中性子に関する実験的研究（再委託先：京都大学）

本研究では、重核種に対する 100 MeV の陽子入射反応における核分裂中性子を測定する。令和元年度および令和2年度は、核分裂中性子測定のためのデータ収集系に関する検討を実施し、実験条件および中性子エネルギースペクトル測定に関する検討を行った。令和3年度は、既往年度の検討結果をもとに、核分裂中性子測定用の中性子検出器を支持する架台に関する検討を実施し、架台の製作を実施した。令和4年度は、実際に核分裂中性子の測定を実施した。以下に、本研究項目の令和4年度までの研究成果についてまとめる。ここでは、既往年度の成果報告書 [3-3.1][3-3.2][3-3.3] の図表を含めた内容も再掲（一部改変）している。

(1) 核分裂中性子のデータ収集系に関する検討【R1】

図 3-139 に核分裂中性子測定用中性子検出器の配置を示し、図 3-140 に測定回路の模式図を示す。核分裂中性子の測定では、真空チェンバ内に核分裂片検出器（MCP 4 台および MWPC 4 台）を配置し、標的から 400 mm 離れた真空チェンバ外の位置（飛行距離 400 mm）に、直径 127 mm × 長さ 51 mm の有機液体シンチレータと光電子増倍管を組み合わせた中性子検出器を複数本配置する。中性子検出器はできる限り多い方が望ましいが、ここでは現実的な数として 8 台を仮定して検討を進めた。実験では、これらの検出器を用いて、核分裂片検出器で検出された核分裂片の信号をスタート信号、中性子検出器の信号をストップ信号として飛行時間（TOF）を測定し、測

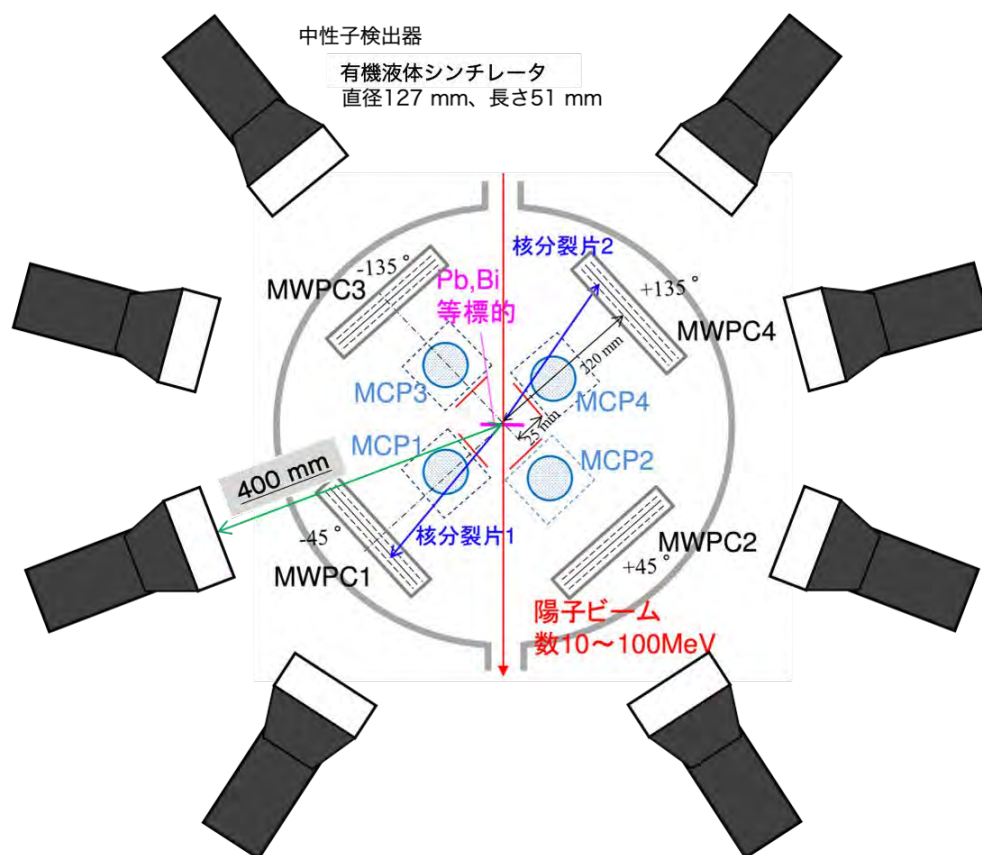


図 3-139 核分裂中性子測定用中性子検出器の配置

定で得られる TOF をエネルギーに換算してエネルギースペクトルを求める。データ収集システムには、FPGA が搭載された 16 チャンネルデジタイザ SIS3316 を用いる。図 3-4 に示されているように、SIS3316 は最大 16 系統の電気信号を同時に処理することができ、3.1 節の実験ですでに使用実績があるものである。核分裂片検出器に 8 系統 (MCP に 4 系統、MWPC に 4 系統)、中性子検出器に 8 系統の同軸ケーブルを SIS3316 に接続することで、核分裂片と核分裂中性子の同時測定が可能となる。

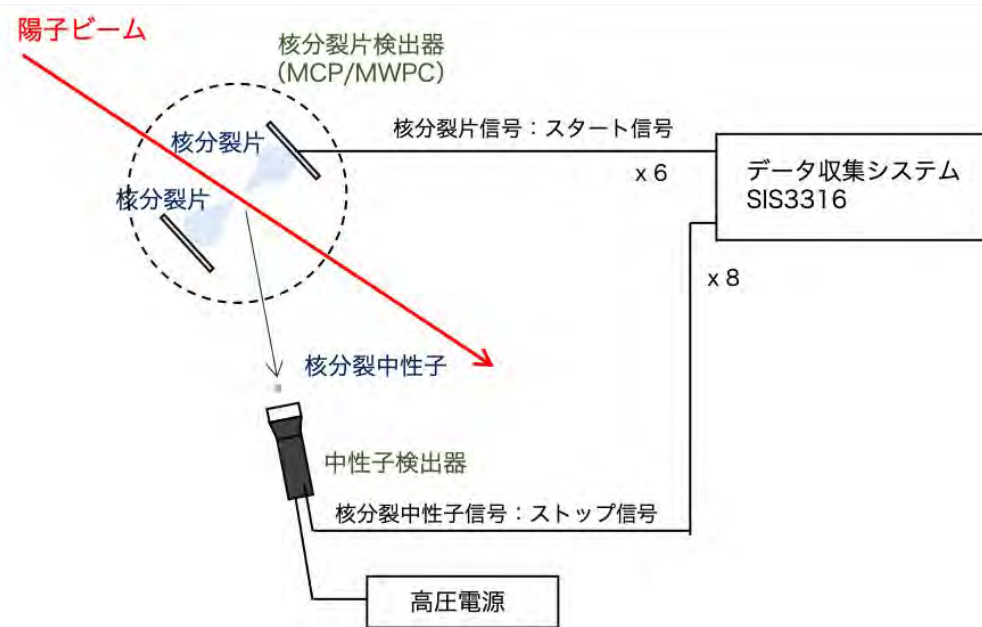


図 3-140 核分裂中性子測定における測定回路の模式図

(2) 核分裂中性子のエネルギースペクトルに関する検討【R2】

中性子検出器の配置検討に引き続き、中性子検出器に入射する核分裂中性子について角度分布を考慮して核分裂中性子エネルギースペクトルの検討を令和 2 年度に実施した。解析には放射線挙動解析コード PHITS [3-3.4] を用いた。図 3-141 および図 3-142 に、それぞれ鉛およびビスマス標的に対する DDX 解析値のエネルギースペクトルを示し、図 3-143 および図 3-144 にその角度分布を示す。これらの図より、核反応で放出される核分裂中性子の数は核破砕中性子の数より一桁以上小さく核分裂中性子の放出角分布は 20 MeV 以上の高エネルギー領域で前方性が見られるものの、核破砕中性子ほど強い前方性は示さないことがわかった。

図 3-139 に、核分裂中性子測定用中性子検出器の配置図を示す。ここでは、直径 127 mm × 長さ 51 mm (直径 5 インチ × 長さ 2 インチ) の大型の有機液体シンチレータと光電子増倍管を組み合わせた中性子検出器を真空チェンバの側面に 8 台配置し、核分裂中性子を測定することを想定した。標的と中性子検出器との距離は 400 mm とした。このときの中性子検出器 1 台および核分裂片検出器 (MWPC) 1 台あたりの立体角は図 3-145 で示した公式より幾何学的にそれぞれ 1.17 sr および 77.7 msr (ミリステラジアン) と求められる。標的は、100~200 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度の厚さの鉛およびビスマス試料を用いる。ここでは、標的厚さを 200 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ とし、陽子ビーム電流を 150

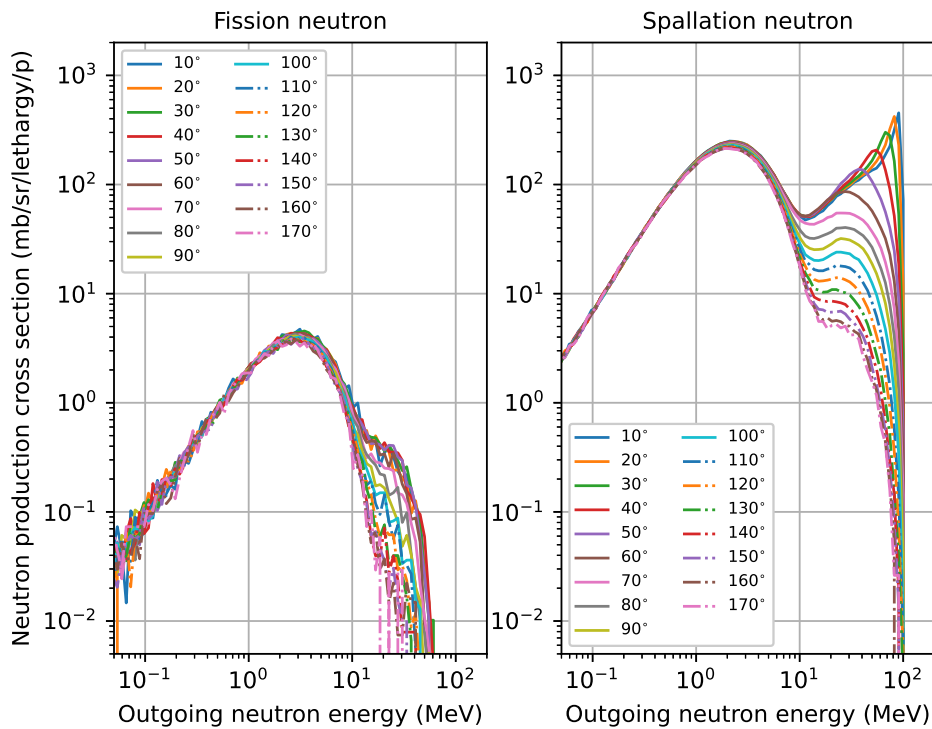


図 3-141 鉛標的に対する核分裂中性子および核破砕中性子生成 DDX 解析値 (図中の線はそれぞれの測定角に対するエネルギースペクトルを表す)

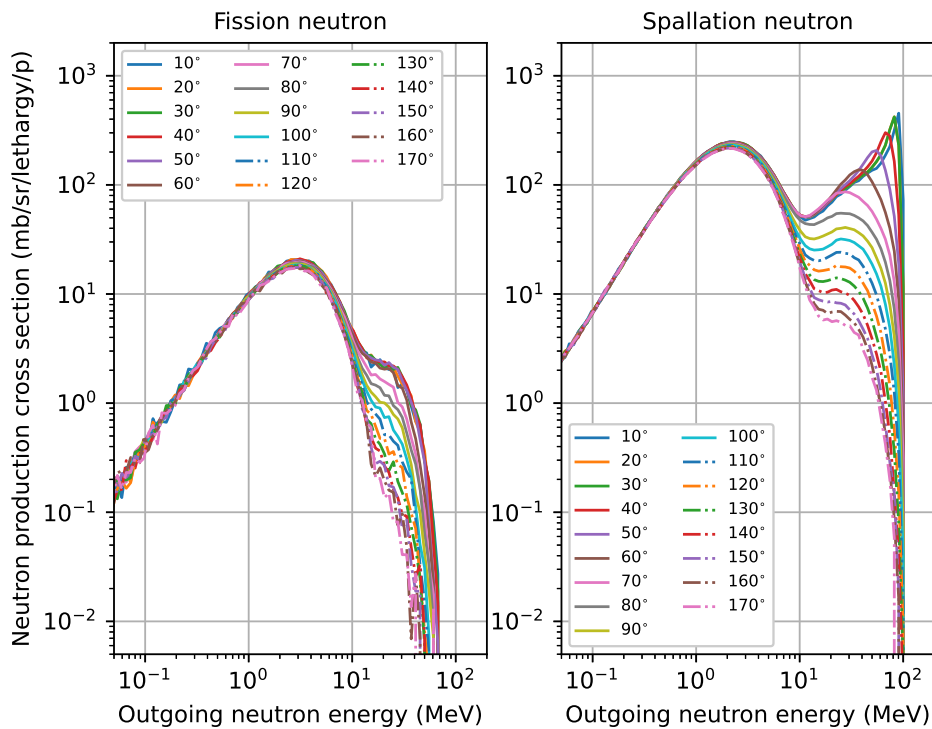


図 3-142 ビスマス標的に対する 100 MeV 陽子入射核分裂中性子および核破砕中性子生成 DDX 解析値 (図中の線はそれぞれの測定角に対するエネルギースペクトルを表す)

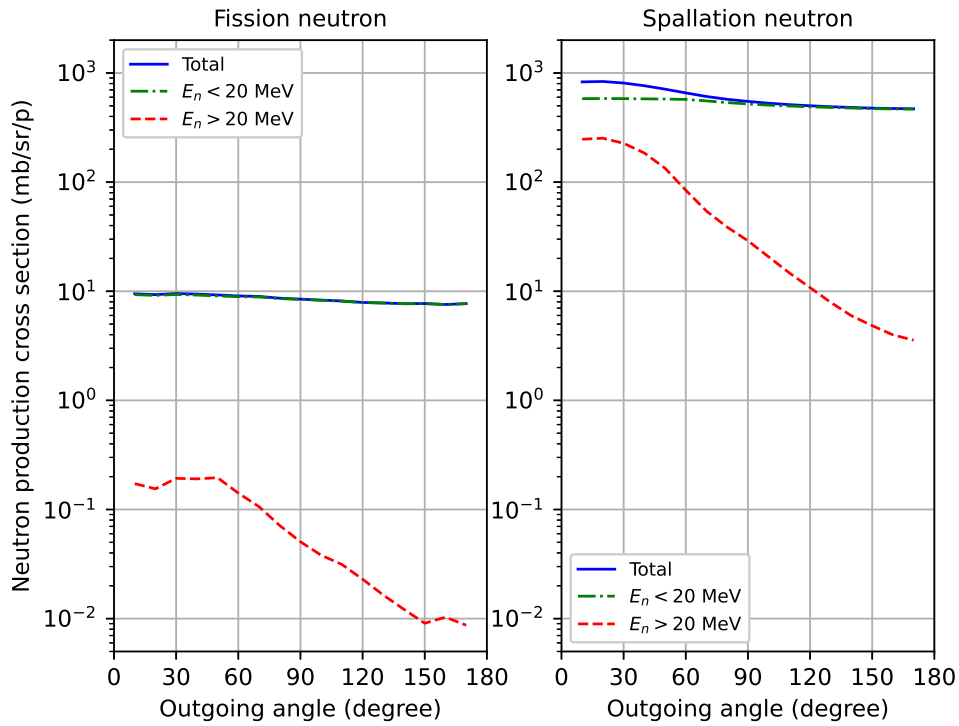


図 3-143 鉛標的に対する核分裂中性子および核破砕中性子生成断面積の角度分布解析値

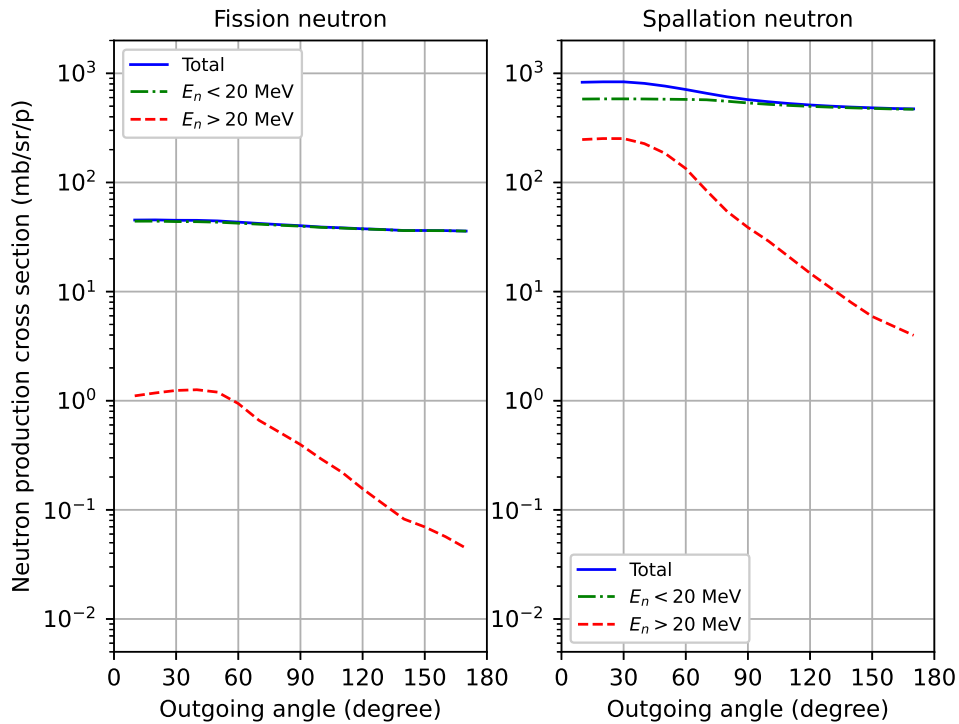


図 3-144 ビスマス標的に対する中性子生成断面積の角度分布解析値

pA とした。2 MeV 以上のエネルギー領域の測定可能な ^{137}Cs のコンプトン端の半波高の発光量をバイアス (^{137}Cs ハーフバイアス) として用いた。本検討における計算条件を表 3-22 に示し、図 3-146 に、検出効率計算コード SCINFUL-R [3.3-5][3.3-6] による核分裂中性子測定用中性子検出器の入射中性子エネルギーに対する中性子検出効率の解析値を示す。

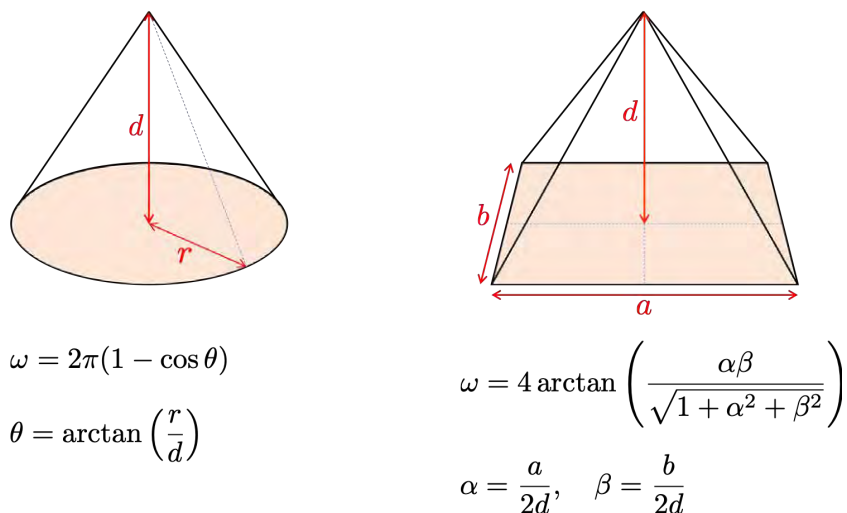


図 3-145 直円錐（左）および直方錐（右）の立体角の公式（核分裂中性子測定用中性子検出器： $d = 400$ mm、 $r = 63.5$ mm より $\omega = 77.7$ msr、MWPC： $d = 220$ mm、 $a = b = 140$ mm より $\omega = 1.17$ sr）

表 3-22 核分裂中性子測定の検討における計算条件

| | 値 |
|-------------------------|--------------------------------------|
| 中性子検出器（有機液体シンチレータ）寸法 | $\varnothing 127$ mm \times L51 mm |
| 中性子検出器設置数 | 8 |
| 標的と中性子検出器との距離 | 400 mm |
| 中性子検出器 1 台当たりの立体角 | 77.7 msr |
| 標的厚さ | $200 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ |
| 核分裂片検出器（MWPC）1 台当たりの立体角 | 1.17 sr |
| 陽子ビームエネルギー | 100 MeV |
| 陽子ビーム電流 | 150 pA |
| 陽子ビーム繰り返し | 30 Hz |

図 3-147 および図 3-148 に、MWPC に検出された信号をスタート信号として中性子検出器 1 台に検出される核分裂中性子および核破砕中性子の 1 ショット当たりのカウント数のエネルギー分布の推定結果を、それぞれ鉛およびビスマス標的に対して示す。図 3-149 に、鉛およびビスマス標的に対する核分裂中性子カウントの角度分布を示す。これらの図より、両標的とも 1 台の中性子検出器に陽子ビーム 1 ショット当たり約 0.2~0.3 個（すなわち 1 秒当たり約 6~9 個）の核分裂中性子が検出されることがわかった。

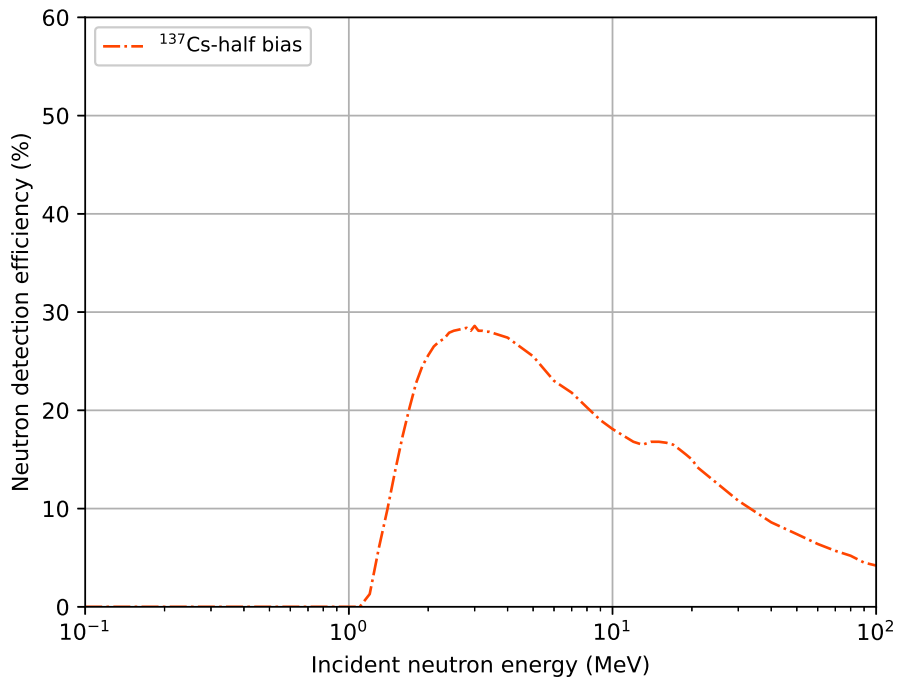


図 3-146 核分裂中性子測定用中性子検出器の入射中性子エネルギーに対する中性子検出効率の解析値

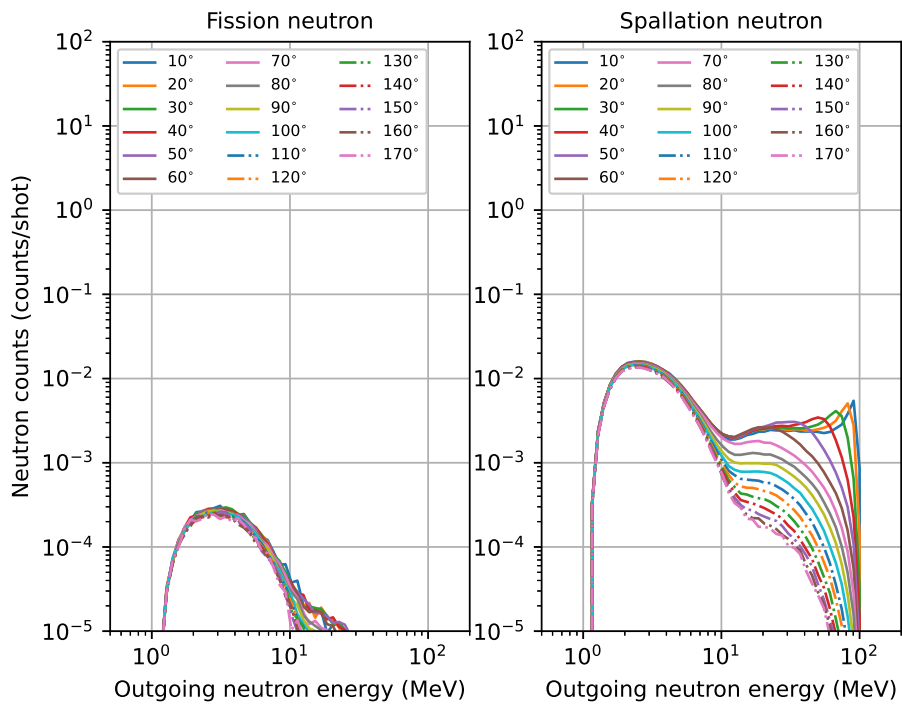


図 3-147 鉛標的に対する検出角度における1ショット当たりの核分裂中性子カウント（左）および核破砕中性子カウント（右）のエネルギー分布

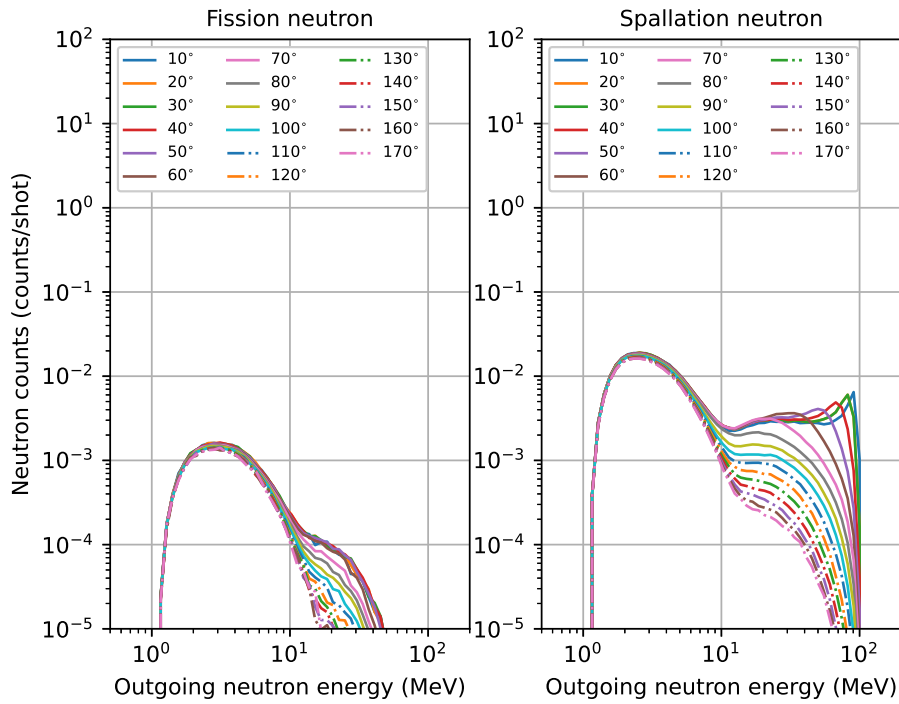


図 3-148 ビスマス標的に対する検出角度における1ショット当たりの核分裂中性子カウント (左) および核破碎中性子カウント (右) のエネルギー分布

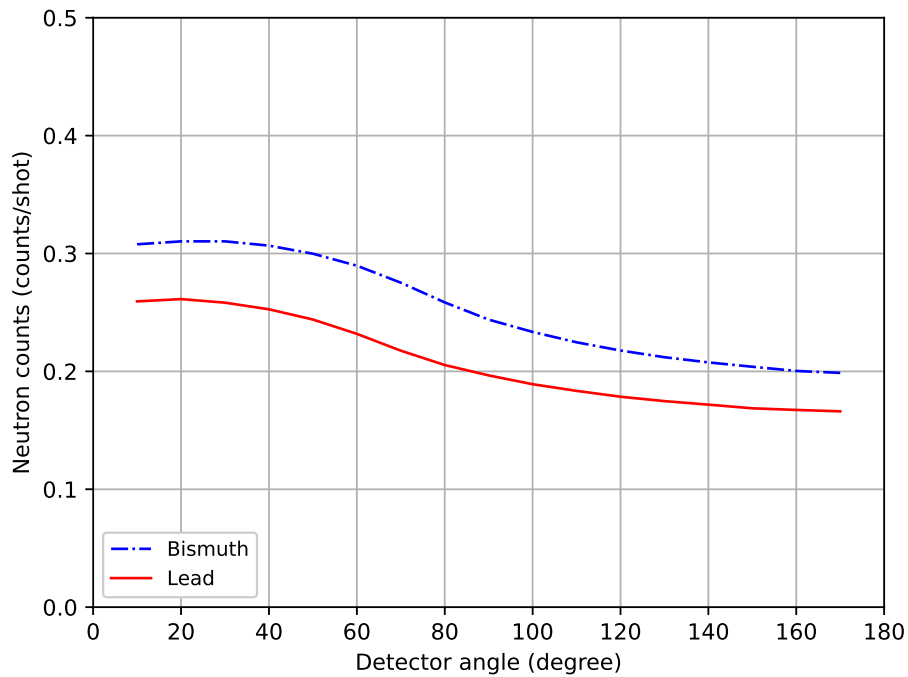


図 3-149 ビスマスおよび鉛標的に対する検出角度における1ショット当たりの核分裂中性子カウントの角度分布

(3) 中性子検出器架台の設計および製作【R3-R4】

令和2年度に検討した核分裂中性子測定用中性子検出システムの検討結果を反映して、中性子検出器を支持する中性子検出器架台を設計し、製作した。図3-150および図3-151に、それぞれ中性子検出器架台の平面図および立面図を示す。設計にあたっては、以下の点を満たすように留意した。

- 中性子検出器架台は、図3-152に示す寸法（長さ486 mm、直径170 mm）の中性子検出器を可能な限り多く支持する構造とする。
- 真空チェンバの周囲片側に設置し、周辺機器、ビームラインおよびその周辺機器に干渉しない構造とする。
- 中性子検出器の検出器面の中心が、ビームラインと同じ高さの床面に平行な面（高さ1200 mm）上に設置できる構造とするとともに、可能な限り標的に近い位置に設置できる構造とする。
- 移動しやすいように架台にはキャスターを設ける。

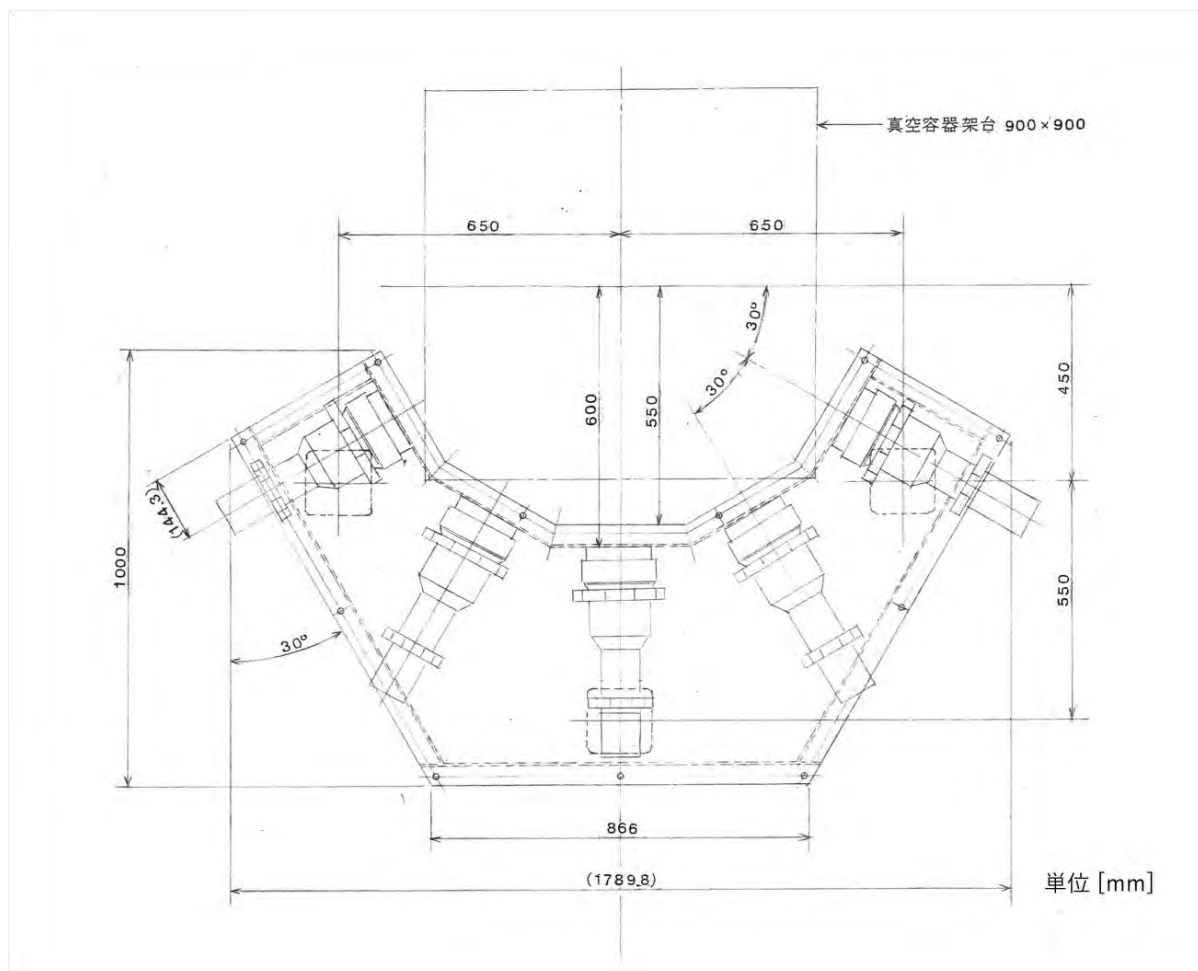


図3-150 中性子検出器架台の設計図面（平面図）

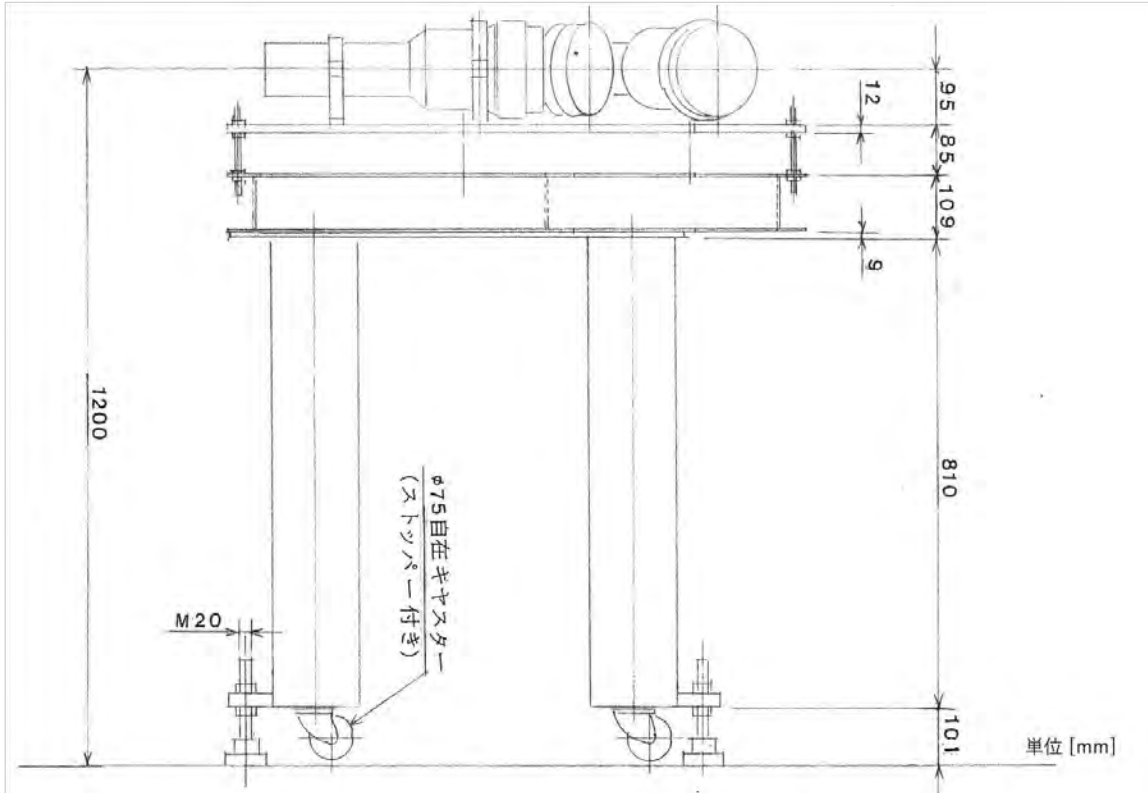


図 3-151 中性子検出器架台の設計図面 (立面図)

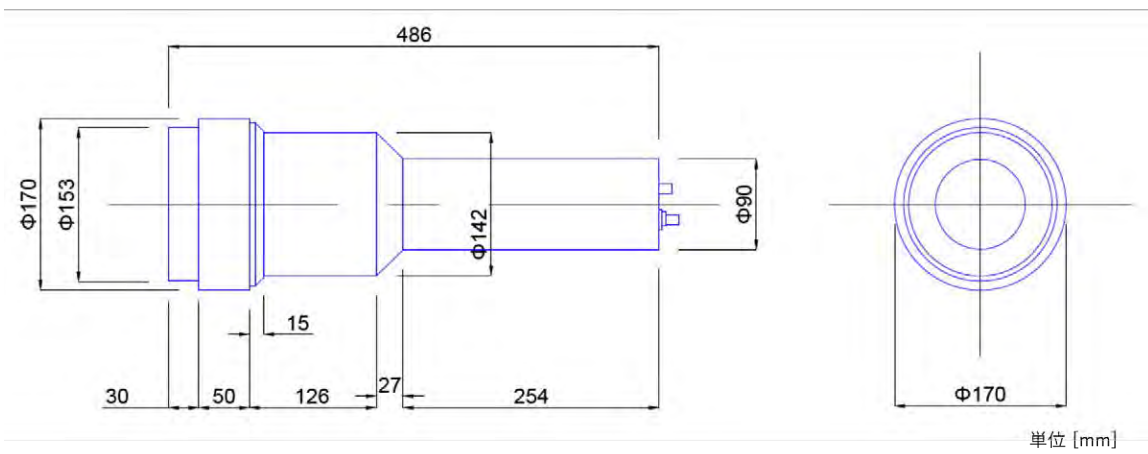


図 3-152 中性子検出器の図面

以上の設計条件を満たす中性子検出器架台を2台、ビーム進行方向右側設置用および左側設置用に製作した。製作した中性子検出器架台を図3-153および図3-154に示す。設計および製作の結果、この架台に設置できる中性子検出器は5台となり、標的と検出器までの距離、すなわち核分裂して生じた中性子の標的から検出器までの飛行距離は600 mmとなった。このときの中性子検出器1台当たりの立体角は、図3-145の式より34.9 msr（ミリステラジアン）である。



図3-153 製作した中性子検出器架台の写真（令和3年度製作）



図3-154 製作した中性子検出器架台の写真（令和4年度製作）

(4) 核分裂中性子測定【R4】

測定体系

FFAG 加速器から出射する 107 MeV 陽子をビスマス箔に入射し、核分裂中性子の測定を行った。初めに試験として核分裂片測定の際に中性子検出器を設置して測定を行った。測定の様子の写真を図3-155に示す。試験では口径5インチ長さ2インチの有機液体シンチレータを110°に設置し測定した。この結果、MWPCと同時計測する中性子検出事象があるものの、核分裂反応以外で生じる偶発的な中性子検出事象が多数あり、この状態では正常な測定が困難であることがわかった。

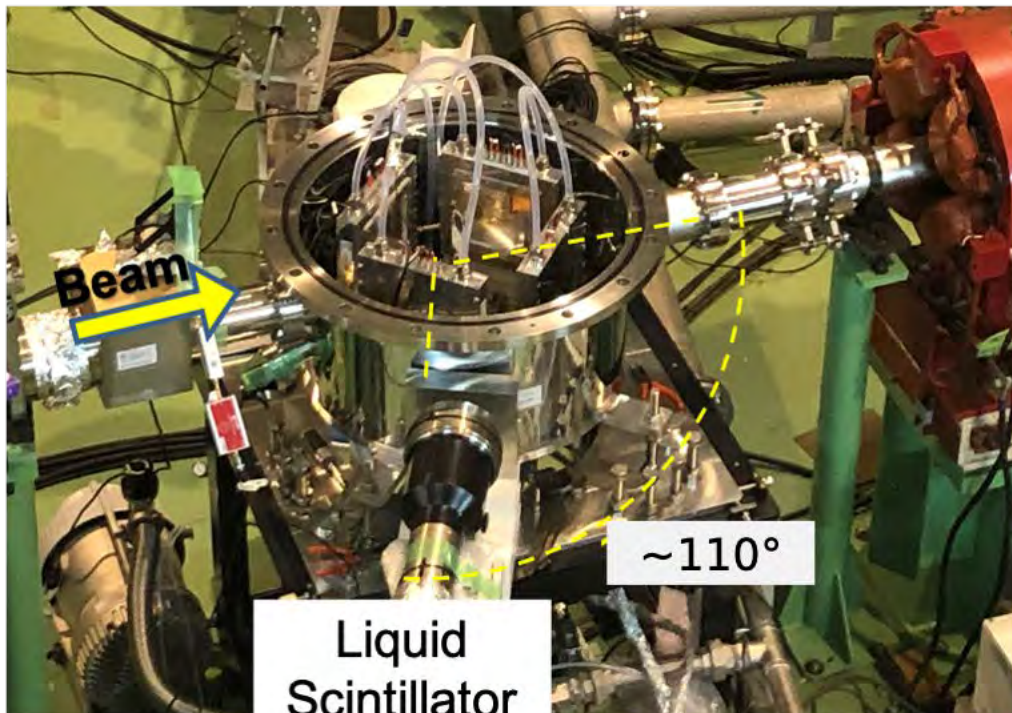


図 3-155 核分裂中性子の試験測定に用いた実験体系（真空チェンバーは上蓋を開放した状態で撮影したが、ビーム試験期間中には上蓋を閉止し中を真空にした）

中性子検出における偶発的な事象は、ビームダンプから生成される中性子や、加速器から標的まで陽子ビームが輸送される際のビームロスによって生じると考えられる。そのため、実験では偶発的な事象を抑制するために、ステンレス (SUS)、鉛、鉄およびコンクリートからなる重厚な遮蔽体を中性子検出器の周囲に設置した。この遮蔽体の写真を図 3-157 に示す。重厚な遮蔽体が必要であったため、検出器を複数のビーム入射角度に対して配置することは困難であった。そのため、測定角度は遮蔽がもっとも容易な 90° のみに限定した。

ビーム電流が高い場合は、MWPC と中性子検出器で数え過ぎによりパイルアップが発生するため、正しい計測を行えない。このため、ビーム電流を 50 pA 以下に抑えた。さらに、偶発的な計数を抑制するため、ビームパルス長を長くし、ピーク電流を低くする手法を開発した (3.1 節、図 3-103)。この手法により、陽子ビームの運動量 (エネルギー) の広がりを抑え、標的におけるビーム幅を縮小できた。その結果、ビームの裾野 (ハロー) が標的試料ホルダ (ステンレス製) に当たって生成する中性子による偶発的な検出事象が抑制された。

試験測定の結果から、中性子検出器の周辺の遮蔽が重要であることがわかったため、実際の測定では、3.1 節と同様に、中性子遮蔽が容易な小型の中性子検出器を用い、表 3-23 に示す条件で核分裂中性子の測定を行った。小型の中性子検出器を用いることで、計数率は計算評価に用いた値よりも低くなった。そのため、効率的な測定を行うため、比較的大きな核分裂断面積を持つ ^{209}Bi (天然存在比 100%) を標的に使用した。測定には約 1ヶ月の長期間を要した。

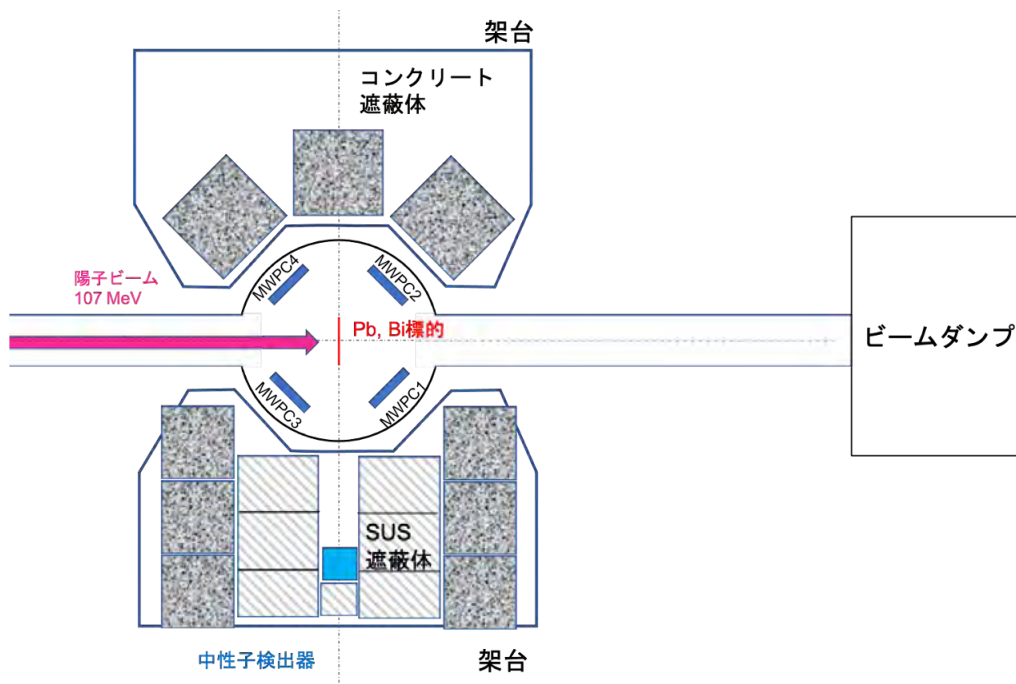


図 3-156 核分裂中性子測定に用いた実験体系



図 3-157 核分裂中性子測定に用いた実験体系の様子（中性子検出器周辺に遮蔽体を設置し、測定は 90° 方向のみ実施した。中性子検出器は重厚な遮蔽体内に設置したため、本映像では確認できない）

表 3-23 核分裂中性子測定に用いた実験条件

| | 値 |
|---------------------------|------------------------|
| 有機液体シンチレータの形状 | ∅8 mm × L 20 mm |
| 中性子検出器設置数 | 8 |
| 標的と中性子検出器との距離 | 690 mm |
| 中性子検出器 1 台当たりの立体角 | 0.11 msr |
| 標的厚さ | 193 μg/cm ² |
| 核分裂片検出器 (MWPC) 1 台当たりの立体角 | 1.17 sr |
| 陽子ビームエネルギー | 107 MeV |
| 陽子ビーム電流 | ≤ 50 pA |
| 陽子ビーム繰り返し | 30 Hz |

スタート信号となる核分裂片の測定

核分裂発生事象の基準となる核分裂片の測定には MWPC を用いた。この測定は、3.2 節で行われた「高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究」と同様の手法であるが、核分裂中性子の測定では、中性子検出器が検出した粒子を波形弁別によって中性子と光子に分類する必要があったため、3.2 節の核分裂反応の実験で用いたデータ収集系では対応できなかった。そのため、本測定では図 3-4 に示す SIS3316 を用い、中性子検出器の波形弁別により中性子と光子との検出事象を分類し、中性子検出事象を得た。

MWPC と中性子検出器 (シンチレータ) の出力信号を図 3-158 に示す。この図では、核分裂片を MWPC2 と MWPC3 の対で検出した際の中性子検出事象の信号が示されている。全ての出力信号は十分大きく、加速器の電磁石に起因する電磁波ノイズよりも十分大きな信号であることを確認した。また、測定で得られた核分裂片の飛行時間差スペクトルを図 3-159 に示す。この図では、MWPC1 と MWPC4、さらに MWPC2 と MWPC3 の飛行時間差スペクトルが示されている。この図により、核分裂片の検出時間情報が 3.2 節の結果とほぼ同じであることが示され、データ収集系は異なるものの、核分裂片における生成時間の情報が問題なく測定できたことを確認した。

核分裂中性子スペクトルの測定および結果

中性子検出器による中性子検出情報をもとに、核分裂中性子スペクトルを導出した。核分裂片検出器の MWPC は試料の全方向 (4π 方向) を包囲していないため、核分裂片は 4π 方向に等方に生成すると仮定し、核分裂中性子スペクトルを導出した。MWPC の検出時間を基準とし飛行時間スペクトルを生成し、以下の式で核分裂中性子のスペクトルを導出した。

$$\frac{d^2\sigma}{du d\Omega} = \frac{N_{Fn}(E_n)}{\Delta u \Delta\Omega N_p N_t \epsilon(E_n) \eta(E_n)} \frac{4\pi}{\Delta\Omega_{MWPC}} \quad (3.33)$$

上式は、3.1 節に示した中性子生成二重微分断面 (DDX) の導出で用いた式 (3.9) とほぼ同じとなるが、MWPC とほぼ同時に計数された核分裂中性子の計数 ($N_{Fn}(E_n)$) と二対の MWPC が張る立体角 ($\Delta\Omega_{MWPC}$) で規格化した値となる。波形弁別によって得られた中性子の飛行時間は、

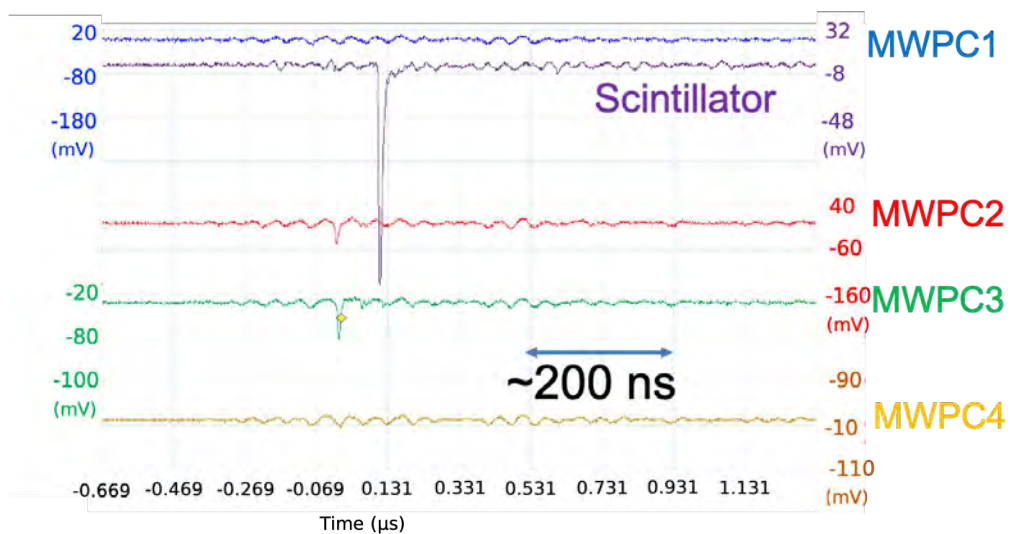


図 3-158 核分裂中性子測定における MWPC と中性子検出器の出力信号（上から 2 番目の Scintillator が中性子検出器、赤線および緑線が対となる MWPC2 と MWPC3 の出力信号を示す。本事象は核分裂が生じた際の中性子測定信号となる）

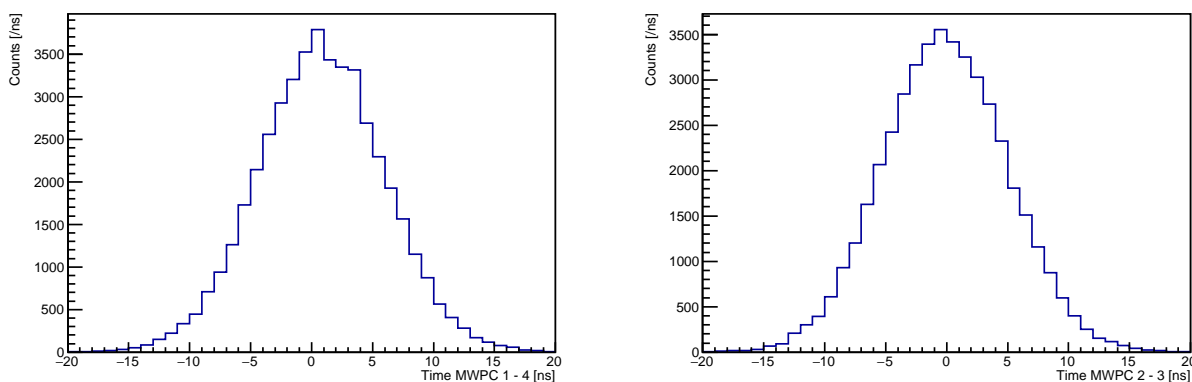


図 3-159 核分裂中性子測定における MWPC による時間差スペクトル（図の左右に MWPC1 と MWPC4、および MWPC2 と MWPC3 における時間差の分布をそれぞれ示す）

核分裂事象に伴う即発ガンマ線の検出時間を基準に中性子のエネルギー関数に変換し、中性子の検出効率で除した。

実験で得た ^{209}Bi の 90° 方向に生成する核分裂中性子スペクトルの実験値を図 3-160 に示す。図では実験の統計誤差を示す。図 3-160 には、比較のため PHITS の計算結果も示す。この結果、PHITS に用いられている計算モデルの結果はおおむね 1σ の実験不確かさの範囲内で一致した。そのため、PHITS に用いられる核分裂中性子の計算モデルは妥当と考えられる。

なお、実験は長時間測定を要したため、 ^{208}Pb 標的を用いた測定はできなかった。 ^{208}Pb の核分裂断面積は ^{209}Bi に比べ約半分 (^{208}Pb 核分裂断面積が 100 mb に対して、 ^{209}Bi の核分裂断面積は 40 mb) となるが、中性子生成 DDX の実験結果は両者ではほぼ同じ分布となることから、絶対値は異なるものの鉛の核分裂中性子スペクトルの形状はビスマスのものとはほぼ同じになると考えられる。これは、図 3-141 および図 3-142 の計算に示されるように核分裂中性子スペクトルはほとんどが蒸発過程で生成し、スペクトル形状も鉛とビスマスで同一となることから理解できる。

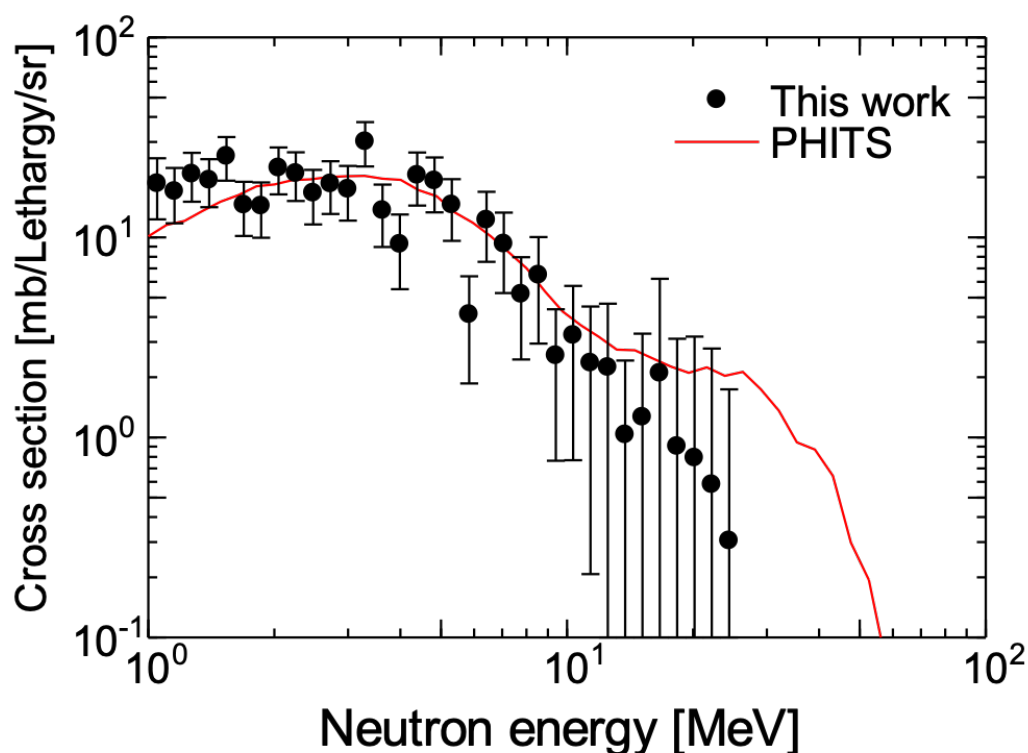


図 3-160 ^{209}Bi の核分裂中性子スペクトル (測定角度はビームに対し 90° となる。横軸に中性子エネルギー、縦軸に角度とレサジーの二重微分断面積として示す)

核分裂中性子数に関する考察

実験で取得した核分裂中性子スペクトルをもとに、核分裂中性子数に関して核分裂の計算モデルとの比較検討を行った。表 3-24 に中性子数の実験と PHITS による核分裂の計算モデルが組み込まれたモデル計算との結果を示す。計算では、図 3-142 の核分裂中性子スペクトルをもとに、

核分裂断面積で除することにより核分裂中性子数を得た。実験では 90° のみのデータ取得となったため、全方向 (4 π 方向) に値を規格化した。計算値の 90° 方向に生成する値を全方向に規格化した値は、全方向の値と等しくなったため、90° 方向の値を全方向に規格化することはほとんど問題ないと考えられる。これは図 3-144 に示す核分裂中性子生成における角度微分断面積が、ほぼ等方な分布となり、90° 方向のその平均的な値となることから理解できる。実験では 1 MeV 以下の中性子のスペクトルが取得できなかったため、1 MeV 未満の核分裂中性子数計算値を使用した。実験における 1 MeV 以上の核分裂中性子数の相対的な不確かさは 45% であり、統計的な精度に課題はあるものの、PHITS による解析結果は実験の不確かさ (1 σ) の範囲内に収まることがわかった。

表 3-24 核分裂中性子数

| | 単位 | PHITS | 実験 |
|----------------------|-------|-------|-----------------|
| 核分裂断面積 | mb | 100 | 100 |
| 中性子数 | 個/核分裂 | 2.19 | |
| 90° 方向を全方向に規格化した中性子数 | 個/核分裂 | 2.19 | 2.53 \pm 0.94 |
| (1 MeV 以上の中性子数) | 個/核分裂 | 1.74 | 2.07 \pm 0.94 |
| (1 MeV 未満の中性子数) | 個/核分裂 | 0.46 | (0.46 計算値を使用) |

放出中性子数に関する考察

本研究における核分裂中性子測定の結果と中性子生成 DDX 測定および PHITS による核分裂片解析の結果をまとめると、ビスマスに対する 100 MeV 領域陽子入射反応における中性子の放出について、以下の結論が導かれる。

ビスマスに対する 100 MeV 領域の陽子入射反応では、1 回の核反応で平均約 4.02 個 (相対不確かさ 3%) の中性子が放出される (核内カスケード過程で 0.70 個 (相対不確かさ 11%)、脱励起過程で 3.32 個 (相対不確かさ 2%) 放出) 【3.1 節、DDX 測定結果】。核分裂が発生する場合、核内でカスケード衝突が起きてから核分裂が発生するまでに平均 9~10 個の中性子が放出され 【3.2 節、核分裂モデルによる推定】、核分裂発生時に平均約 2.53 個 (相対不確かさ 45%) の核分裂中性子が放出される 【3.3 節 核分裂中性子測定結果】。

この結論は、鉛についても同様である。この測定で評価した核分裂中性子数の不確かさは、DDX 測定で評価した放出中性子数 (中性子多重度) に対して大きくなったが、1 回の核反応で核分裂が発生する確率は 5.6% と低い (陽子入射ビスマス標的核反応断面積が 1777 mb に対して陽子入射ビスマス標的核分裂断面積は 100 mb) ため、ADS のような中性子利用の観点では核分裂中性子の影響は無視できると考えられる⁴ 核分裂が発生する場合と発生しない場合で放出中性子数に差が生じるのは、カスケード衝突後に幅広い励起エネルギーを持った多種多様な高励起原子核が生成さ

⁴核分裂で生じる核分裂片は、ベータ崩壊によって遅発核分裂中性子を放出する (単に遅発中性子ともいう)。遅発核分裂中性子の ADS 設計への影響については依然として不明であることに留意する必要がある (先行研究例: 原田ら (2023) [3.3-7]、Ridikas et al. (2004) [3.3-8])

れるためである。核分裂が発生するまでに多くの中性子が放出されるのは、カスケード衝突後に比較的高い励起エネルギーを持った高励起原子核の方が核分裂を生じやすいことを示唆している。

ところが現状では、核分裂が発生するまでの平均放出中性子数は依然として核分裂モデルによる推定に頼らざるを得ない。この課題は、核分裂片の質量数分布の平均が、核分裂モデルによる推定に頼らざるを得ないことと本質的に同じである。核分裂片の質量数分布と陽子数分布における平均が明らかになれば、先述の平均放出中性子数も自ずと明らかになる。この課題は、逆運動学に基づく断面積測定法を用いた先行研究 (Schmidt ら (2013) [3.3-9]、Wang ら (2017) [3.3-10]) と同様の方法で解決できる可能性がある。この手法は、 ^{208}Pb や ^{238}U などの重イオンビームを水素 (^1H) 標的に照射し、核破碎反応によって生成される核反応生成物の生成断面積を網羅的に測定するものである。逆運動学の原理により、陽子入射核反応における核分裂片の質量数分布や陽子数分布に関する詳細なデータを取得することが可能となる。この手法が技術的に適用可能な国内の施設に、理化学研究所の RI ビームファクトリがある。この施設の利用は今後の検討課題である。

参考文献

- [3-3.1] 令和元年度 文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 原子力システム研究開発事業
「FFAG 陽子加速器を用いた ADS 用核データの実験的研究」成果報告書（令和 2 年 3 月、日本
原子力研究開発機構）
- [3-3.2] 令和 2 年度 文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 原子力システム研究開発事業
「FFAG 陽子加速器を用いた ADS 用核データの実験的研究」成果報告書（令和 3 年 3 月、日本
原子力研究開発機構）
- [3-3.3] 令和 3 年度 文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 原子力システム研究開発事業
「FFAG 陽子加速器を用いた ADS 用核データの実験的研究」成果報告書（令和 4 年 3 月、日本
原子力研究開発機構）
- [3-3.4] Sato T, Iwamoto Y, Hashimoto S, et al., Features of Particle and Heavy Ion Transport
Code System (PHITS) Version 3.02, J. Nucl. Sci. and Technol., vol.55, no.6, 2018, pp.684-
690.
- [3.3-5] Dickens JK, SCINFUL: A Monte Carlo Based Computer Program to Determine a Scin-
tillator Full Energy Response to Neutron Detection for E_n between 0.1 and 80 MeV: User's
Manual and FORTRAN Program Listing, 1988, ORNL-6462, Oak Ridge National Lab. TN
(USA).
- [3.3-6] Meigo S, Measurements of the Response Function and the Detection Efficiency of an
NE213 Scintillator for Neutrons between 20 and 65 MeV, Nucl. Instrum. Methods Phys.
Res. A, vol.401, 1997, pp.365-378.
- [3.3-7] 原田正英, 勅使河原誠, 大井元貴他, 「J-PARC 核破碎中性子源からの遅発中性子の観測」
日本原子力学会 2023 年春の年会, 東京大学.
- [3.3-8] Ridikas D, Bokov P, David JV, et al. Delayed neutrons in liquid metal spallation tar-
gets Proceedings of the International Workshop on Neutron Measurements, Evaluations and
Applications (NEMEA-2), 20–23 Oct., 2004, Bucharest, Romania.
- [3.3-9] Schmidt K-H., Jurado B., Pleskac P., et al., High-precision Measurement of Total Fission
Cross Sections in Spallation Reactions of ^{208}Pb and ^{238}U , Phys. Rev. C, vol.87, 2013,
p.034601.
- [3.3-10] Wang He, Otsu H, Sakurai H, et al., Spallation reaction study for the long-lived fission
product ^{107}Pd , Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, p.021D01.

3.4 研究推進

3.4.1 研究管理【R1-R4】

期間中は、月に1回程度の頻度で定例のビデオ会議を実施し、各研究項目における進捗について議論するとともに研究項目間の連携を密にして研究を行った。一例として令和4年度に用いたMicrosoft Excelによる進捗管理表および実験管理表をそれぞれ図3-161および図3-162に示す。

| A | B | C | D | E | F | G |
|----|--------|--------------------------------|---|---|---|---|
| 2 | 132251 | 研究推進表：FFAG電子加速器を用いた高エネルギーの実験研究 | | | | |
| 3 | | 研究推進表：FFAG電子加速器を用いた高エネルギーの実験研究 | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 6 | | | | | | |
| 7 | | | | | | |
| 8 | | | | | | |
| 9 | | | | | | |
| 10 | | | | | | |
| 11 | | | | | | |
| 12 | | | | | | |
| 13 | | | | | | |
| 14 | | | | | | |
| 15 | | | | | | |
| 16 | | | | | | |
| 17 | | | | | | |
| 18 | | | | | | |

図 3-161 研究進捗管理表 (令和4年度)

令和元年10月30日に京大複合原子力科学研究所において本研究のキックオフ会議を開催し、本研究で実施する実験に関する課題について原子力機構および京大の共同研究者ならびに放射線管理担当者と議論した。当初は、重核種として鉛、ビスマスおよび非密封MAを用いて高励起核種の核分裂に関する実験を実施することを希望していた。議論の結果、FFAG加速器施設の管理区域における非密封MAの使用は放射線使用許可上難しいが、鉛とビスマスを用いた実験は計画どおり実施できることがわかった。

令和2年1月28日に発生したFFAG加速器施設の火災事故や新型コロナウイルス(COVID-19)の世界的な蔓延により、実験の実施に遅れが懸念されたが、年度計画どおりに実験を実施できた。FRSにおける中性子検出器の応答試験やFFAG加速器を用いた実験では、実験参加の日程を分散する、ビデオ会議を活用する、マスクを着用する、実験控え室を設ける、実験中は換気をするなどの3密(密集、密接、密閉)を防ぐ対策をとりながら実験を行った。FFAG加速器を用いた実

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|----|----|---|-----|------|------|------|-------------|------|----|
| | | | 日 | 月 | 火 | 水 | 木 | 金 | 土 |
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | 2月 | | | 30 | 31 | | 1 | 2 | 3 |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | |
| 12 | | | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 13 | | | 移動日 | 午前移動 | | 夕方帰宅 | | 夕方帰宅 | |
| 14 | | | | | | | 午前移動 | 帰宅 | |
| 15 | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | |
| 20 | | | 移動日 | | | 夕方帰宅 | | | 帰宅 |
| 21 | | | | | | | | | |
| 22 | | | | 4 | 4 | 4 | 3 | 2 | |
| 23 | | | | | | | | | |
| 24 | | | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 25 | | | 移動日 | 午前移動 | 夕方帰宅 | | X 夕方帰宅 | | |
| 26 | | | | | | | | 朝移動 | 帰宅 |
| 27 | | | | | | | | | |
| 28 | | | 移動日 | | | | | 夕方帰宅 | |
| 29 | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | | | |
| 34 | | | | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | |
| 35 | | | | | | | | | |
| 36 | | | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 (祝日) | 24 | 25 |
| 37 | | | 移動日 | | | | 移動日 夕方帰宅 | | 帰宅 |
| 38 | | | | | | | | | |
| 39 | | | 移動日 | | | | | | 帰宅 |
| 40 | | | | | | | | | |
| 41 | | | 移動日 | | | | | | 帰宅 |
| 42 | | | 移動日 | | | | | | 帰宅 |
| 43 | | | 移動日 | | | | | | 帰宅 |
| 44 | | | | | | | | | |
| 45 | | | | | | | | | |
| 46 | | | | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | |
| 47 | | | 26 | 27 | 28 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 48 | | | 移動日 | | | 帰宅 | | | |
| 49 | | | | | | | | | |
| 50 | | | | | | | | | |
| 51 | | | | | | | | | |
| 52 | | | | | | | | | |
| 53 | | | | | | | | | |
| 54 | | | | | | | | | |
| 55 | | | 移動日 | | | 帰宅 | | | |
| 56 | | | 移動日 | | | 帰宅 | | | |
| 57 | | | | | | | | | |
| 58 | | | 人数 | 3 | 3 | | | | |

図 3-162 実験管理表（令和4年度2月の実験、ハイライト部分は実験のための移動および参加日を表す）

験は、加速器のコンディションが良好な秋季から春季にかけて実施した。

3.4.2 研究成果発表【R1-R4】

本研究を開始後、研究計画の概要、進捗状況および研究成果を国内外の学会および研究会で報告し、外部有識者から研究結果の考察等に関する貴重な助言を受けた。以下に、研究成果発表の記録を示す。

口頭発表

- [1] Nakano K, Iwamoto H, Meigo S, et al., Experimental Program of Nuclear Data for Accelerator-driven Nuclear Transmutation System Using FFAG Accelerator – First Subprogram: Spallation Neutron Measurement, Symposium on Nuclear Data 2020, 26–27 November 2020, RIKEN Wako Campus.
- [2] 岩元大樹, 明午伸一郎, 西尾勝久他, FFAG 陽子加速器を用いた ADS 用核データの実験的研

究, 日本原子力学会 2021 年春の年会, 2021 年 3 月 17 日 ~ 3 月 19 日, オンライン開催.

- [3] 中野敬太, 岩元大樹, 明午伸一郎他, FFAG 陽子加速器を用いた鉄標的からの中性子エネルギースペクトルの測定, 日本原子力学会 2021 年秋の大会, 2021 年 9 月 8 日 ~ 9 月 10 日, オンライン開催
- [4] Iwamoto H, Nakano K, Meigo S, et al., Measurement of 107-MeV proton-induced double-differential neutron yields for iron for research and development of accelerator-driven system, Symposium on Nuclear Data 2021, 12–16 November 2020, オンライン開催
- [5] 上杉智教, 熊取 FFAG における短パルスビーム取り出し, 第 18 回日本加速器学会年会, 2021 年 8 月 9 日 ~ 8 月 12 日, オンライン開催
- [6] 中野敬太, 岩元大樹, 明午伸一郎他, FFAG 陽子加速器を用いた鉛およびビスマス標的からの中性子エネルギースペクトルの測定, 日本原子力学会 2022 年春の年会, 2022 年 3 月 16 日 ~ 3 月 18 日, オンライン開催
- [7] Iwamoto H, Nakano K, Meigo S, et al., Measurement of double-differential neutron yields for iron, lead, and bismuth induced by 107-MeV protons research and development of accelerator-driven systems, 15th International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2022), 21–29 July 2022, オンライン開催
- [8] 岩元大樹, 明午伸一郎, 佐藤大樹他, 鉄、鉛およびビスマスに対する 107MeV 陽子入射中性子収量の測定と解析, 日本原子力学会 2022 年秋の年会, 2022 年 9 月 7 日 ~ 9 月 9 日, 茨城大学
- [9] 上杉智教, 石禎浩, FFAG 加速器における任意パルス長ビーム取り出し第 19 回日本加速器学会年会, 2022 年 10 月 18 日 ~ 10 月 21 日, オンライン開催
- [10] 明午伸一郎, 岩元大樹, 中野敬太他, 京都大学 FFAG 加速器を用いた加速器駆動型核変換システム (ADS) 用核データの実験的研究, 第 19 回日本加速器学会年会, 2022 年 10 月 18 日 ~ 10 月 21 日, オンライン開催
- [11] Iwamoto H, Nakano K, Meigo S, et al., Measurement of 100-MeV range reaction data using the fixed field alternating gradient accelerator at Kyoto University, Symposium on Nuclear Data 2022, 17–18 November 2022, 近畿大学
- [12] 岩元大樹, 明午伸一郎, 佐藤大樹他, 京都大学 FFAG 加速器を用いた核データ測定実験における中性子生成二重微分断面積の解析および ^{237}Np 核分裂計数管を用いた核破砕中性子場の測定, 日本原子力学会 2023 年春の年会, 2023 年 3 月 14 日 ~ 3 月 18 日, 東京大学

論文・プロシーディングス

- [1] Nakano K, Iwamoto H, Meigo S, et al., Experimental program of nuclear data for accelerator-driven nuclear transmutation system using FFAG accelerator –First subprogram: spallation

neutron measurement, Proceedings of the 2020 Symposium on Nuclear Data; November 26–27, 2020, RIKEN Nishina Center, RIKEN Wako Campus, Saitama, Japan; JAEA-Conf-2021-001, pp.150–155.

- [2] 上杉智教、石禎浩、栗山靖敏他、熊取FFAGにおける短パルスビーム取り出し、第18回日本加速器学会プロシーディングス、TUP026、2021年10月
- [3] Iwamoto H, Nakano K, Meigo S, et al., Measurement of 107-MeV proton-induced double-differential neutron yields for research and development of accelerator-driven systems, Proceedings of the 2021 Symposium on Nuclear Data; November 18–19, 2021, Japan; JAEA-Conf-2022-001, pp.129–133.
- [4] 岩元大樹、明午伸一郎、中野敬太他、京都大学FFAG加速器を用いた加速器駆動型核変換システム(ADS)用核データの実験的研究、第19回日本加速器学会プロシーディングス、TUP040、2023年1月
- [5] Iwamoto H, Nakano K, Meigo S, et al., Measurement of 107-MeV proton-induced double-differential thick target neutron yields for Fe, Pb, and Bi using a fixed-field alternating gradient accelerator at Kyoto University, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.60(4), pp.435–449 (2023).
- [6] Iwamoto H, Nakano K, Meigo S, et al., Measurement of 107-MeV double-differential neutron yields for iron, lead, and bismuth induced by 107-MeV protons research and development of accelerator-driven systems, Proceedings of 15th International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2022), EPJ Web of Conferences (in press).

3.4.3 各研究課題の成果の達成度の評価【R4】

各研究課題の成果の達成度を評価した。以下に、その評価結果を示す。

1. 中性子生成 DDX と TTTY の実験的研究

(a) 測定およびデータ取得

測定およびデータ取得に向けて中性子検出器、シャドーバー、真空チェンバ、標的等の実験装置を開発した。FFAG 加速器施設特有の、高い放射線・ノイズ環境および空間的・時間的制約における測定の諸課題を克服し、当初目標としていた 100 MeV 領域陽子入射中性子生成 DDX と TTTY の取得に成功した。核反応モデルおよび評価済み核データライブラリによる解析値との比較により精度検証を行い、各々の核反応モデルおよび評価済み核データライブラリの高度化に向けた課題を抽出した。JQMD モデルでは、切替時間パラメータの最適値を決定して DDX データの再現性が向上することを示し、モデルの高度化に成功した。TTY 測定における研究成果をまとめ、学術論文誌 Journal of Nuclear Science and Technology に公開された。この研究成果が認められ、令和 5 年 3 月 14 日に第 55 回日本原子力学会賞論文

賞（研究題目：Measurements of 107-MeV proton-induced double-differential thick target neutron yields for Fe, Pb, and Bi using a fixed-field alternating gradient accelerator at Kyoto University、受賞者：岩元大樹、明午伸一郎、佐藤大樹、岩元洋介）を受賞した。鉛標的に 107 MeV 陽子ビームを照射し、核破碎中性子場における ^{237}Np 核分裂事象を測定し、DDX や TTN Y とともに理論モデル高度化のための実験データの取得に成功した。得られた DDX および TTN Y 測定データから、厚い標的からの中性子収率および中性子多重度を評価した。核反応モデルおよび評価済み核データライブラリによる解析値との比較により、ADS 設計に用いる粒子輸送解析コード PHITS の推奨モデルである INCL4.6/GEM が評価値をもっとも良く再現することを示した。さらに、実験で得られた中性子収量の不確かさが中性子源強度に与える影響を調査し、ADS のビーム電流に関するパラメータの感度解析および中性子収量に起因する不確かさ解析が必要となることを示した。

以上により、当初の目標を達成し、目標を大きく上回る成果が得られた。



図 3-163 日本原子力学会賞論文賞受賞の盾

(b) 陽子ビーム短パルス化技術開発

中性子生成 DDX と TTN Y 測定に必要な陽子ビームの短パルス化（ビーム時間幅 10 ns 未満）を令和 3 年度までに実現するとともに、ビームパルス調整機能を新たに追加し、短パルス化技術の高度化に成功した。

以上により、当初の目標を達成した。

2. 高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究

核分裂片質量数分布の測定およびデータ取得に向けてデータ収集装置、核分裂片検出器、

真空チェンバ、標的等の実験装置の開発および試験を実施した。当初目標としていた重核種の鉛 (^{208}Pb) およびビスマス (^{209}Bi) 標的に対する 100 MeV 領域陽子入射核分裂片質量数分布の取得に成功した。取得したデータと核反応モデルによる解析値との比較により、核内カスケード衝突で生成される多種多様な高励起原子核の陽子数・質量数分布と励起エネルギー分布を把握することが今後の課題となることを示した。この課題は、逆運動学に基づく断面積測定法により解決できる可能性があることを示した。

以上により、当初の目標を達成した。

3. 高励起状態の核分裂中性子に関する実験的研究

核分裂中性子の測定およびデータ取得に向けて実験の検討および検出器架台の製作を行った。研究項目 2. と連携して、 ^{209}Bi 標的に対する 107 MeV 陽子入射による核分裂中性子を測定し、核分裂中性子のエネルギースペクトルを導出した。核反応モデルによる解析値との比較により、統計的な精度に課題はあるものの、核反応モデルによる核分裂中性子スペクトルの解析結果は、実験値の不確かさの範囲内に収まることを示した。さらに、核分裂中性子が ADS 開発に与える影響は小さいが、核分裂が発生するまでに放出される中性子数は依然として不明であることを示した。この課題は、研究項目 2 と同様、逆運動学に基づく断面積測定法により解決できる可能性があることを示した。

以上により、当初の目標を達成した。

4. 結言

本研究は、原子力バックエンドの課題克服に向けた新たな技術として ADS を用いた核変換技術に着目したものである。ADS は、核反応工学、加速器技術、原子炉設計、分離技術、燃料製造、材料開発、廃棄物処分などの広範な分野の技術を結集した複合原子力システムであり、多くの技術的課題が存在する。これらのなかで本研究は、核反応工学における ADS の技術的課題に焦点を当てた。

ADS では、GeV 領域陽子と鉛・ビスマス標的との核反応で発生する核破砕中性子を用い、高レベル放射性廃棄物中の MA を核分裂反応させることにより、その有害度を低減させる。ADS の技術的課題に、核破砕中性子収量の予測精度の向上および高エネルギー核分裂で発生する核分裂片の分布の解明が挙げられる。ADS では、様々なエネルギー領域の核反応が中性子や核反応生成物の発生に関与する。現状では入射エネルギー 100 MeV 以下における核破砕反応および高エネルギー核分裂データの不足が、ADS 核特性予測の信頼性評価を困難にしている。

そこで本研究では、京大 FFAG 加速器を用いて、このエネルギー領域における原子番号 70 を超える重核種に対する陽子入射核破砕中性子収量と高エネルギー核分裂に関する核データを測定し、核反応モデルを高度化することにより、ADS の早期実現に資することを目的とした。

これらの目的を達成するため、次の 4 つの項目を立てて研究を進めた。

1. 中性子生成 DDX と TTTY の実験的研究

(a) 測定およびデータ取得

100 MeV 領域陽子入射における鉛およびビスマス標的に対する中性子生成 DDX および TTTY の実験データ取得し、核反応モデルとの比較検討を行う。具体的には、液体有機シンチレーション検出器を用い、標的から発生する中性子のエネルギースペクトルを飛行時間法により測定する。中性子生成 DDX に対しては薄い鉛およびビスマスを標的として用い、TTY に対しては 100 MeV 陽子の飛程以上の厚さの鉄、鉛、ビスマスおよび LBE を標的とし、発生中性子のエネルギースペクトルの実験データを取得する。得られたデータをもとに、ADS の核設計に用いられる核反応モデルとの比較検討を実施する。

(b) 陽子ビーム短パルス化技術開発

現状 100 ns 程度の陽子ビームのパルス幅を 10 ns に短縮する。短縮化はバンチローテーション法とキッカー法の 2 段階で行う。周回ビームに印加している高周波電場で縦方向の位相空間内でバンチの位相空間構造を 90° 回転させることにより、時間的な広がりを運動量の広がりに変換させることで、パルスの圧縮を行う。さらに、パルス先頭部と末尾部のカットを 2 台の取出しキッカー電磁石の励磁タイミングを調整することで行う。すなわち、陽子ビームの短パルス化は高周波加速空洞に印加する高周波電場および取出しキッカー電磁石の励磁の制御を高度化することにより実施する。

2. 高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究

100 MeV 領域陽子入射における重核種の核分裂片の質量数分布の測定を行う。原子力機

構タンデム加速器施設では、例えば $^{237}\text{Np}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^{238}\text{Pu}$ 代理反応による ^{238}Pu 核分裂のデータを励起エネルギー 70 MeV まで測定している。現在の解析では、反応後の全励起エネルギーがすべて ^{238}Pu に与えられると仮定している。この仮定の成立性を検証するため、この仮定で得られる質量数分布と核分裂モデルとの比較検討を行う。

3. 高励起状態の核分裂中性子に関する実験的研究

100 MeV 領域陽子入射における重核種の核分裂中性子のスペクトル測定を行い、核反応モデルの比較検討を行う。有機液体シンチレーション検出器を試料近傍に多数設置し、MWPC の信号をスタート信号とし、飛行時間法により即発中性子のエネルギースペクトルを測定する。得られたデータをもとに、核分裂の計算モデルとの比較検討を実施する。

4. 研究推進

研究代表者のもとで各研究項目間における連携を密にして研究を進める。

以下に、各研究項目の成果および今後の展望を示す。

1. 中性子生成 DDX と TTNY の実験的研究

(a) 測定およびデータ取得

FFAG 加速器で加速された 107 MeV 陽子ビームを標的に照射し、複数の検出角に対して DDX および TTNY を測定した。一連の実験により、107 MeV 陽子入射による鉄 ($^{\text{nat}}\text{Fe}$)、鉛 ($^{\text{nat}}\text{Pb}$) およびビスマス (^{209}Bi) 標的に対する TTNY ならびに 100 MeV 領域陽子入射による鉛およびビスマス標的に対する中性子生成 DDX を取得した。さらに、107 MeV 陽子ビームと鉛標的との核反応で形成される核破砕中性子場における ^{237}Np 核分裂計数率のデータを取得した。ADS 設計に用いる核反応モデルおよび評価済み核データライブラリによる解析値との比較検討により、JQMD モデルの高度化に成功するとともに、現状の核反応モデルおよび評価済み核データライブラリの高度化に向けた課題を抽出した。得られた TTNY および DDX 測定データをもとに中性子収量と中性子多重度をそれぞれ評価し、現状における核反応モデルおよび評価済み核データライブラリの予測精度を検証した。検証により、INCL4.6/GEM モデルが中性子収量と中性子多重度の実験値をもっとも良く再現することを示した。得られた中性子収量データをもとに、中性子収量の不確実性が、ADS 研究で重要となる中性子源強度に与える影響を調査し、今後の ADS 研究に向けた課題を提案した。

今後は、本研究で得られた中性子データを用いて、ADS 実機や ADS 炉物理実験における中性子源強度に関連するパラメータの感度解析や中性子収量に起因する不確かさ解析を行うことが重要である。また、核反応モデルの改良も引き続き重要なテーマとなる。このテーマでは、実験値をもっとも良く再現した INCL4.6/GEM の改良が現実的だが、このモデルは準弾性散乱の記述に課題があることが明らかとなった。この結果を受けて我々は、大強度陽子加速器施設 J-PARC の陽子ビームを用いて、陽子入射準弾性散乱測定実験を実施している [4-1]。J-PARC の他にも国内外に陽子ビームを利

用可能な加速器施設が存在する。これらの施設を有効活用して、核反応モデルの高度化を図っていくことが重要である。

評価済み核データライブラリは、様々な実験結果をもとに物理的な整合性を考慮して評価される。本研究で得られたデータと知見を評価材料に加えることで、ADS 開発において、より信頼性の高い評価済み核データライブラリの開発が期待できる。

(b) 陽子ビーム短パルス化技術開発（再委託先：京大）

原子力機構が行う測定およびデータ取得と連携して、陽子ビームの短パルス化技術開発を実施した。バンチローテーション法とキッカー法の2段階で行うことで10 ns 未満の短パルス化に成功した。さらに、長パルスビームと短パルスビームを選択できるようにパルスビーム調整機能の高度化を行った。

今後は、本研究で培った技術や知見を、九州大学 FFAG 加速器 [4-2] をはじめとする将来の加速器開発に着実に継承し、発展させていくことが求められる。

2. 高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究

FFAG 加速器の陽子ビームを標的に照射し、107 MeV の陽子入射による鉛 (^{208}Pb) およびビスマス (^{209}Bi) に対する核分裂片の質量数分布のデータを取得した。得られた実験データと最新の核反応モデル（核分裂モデル）による解析値との間に不一致があることが明らかとなり、実験と理論の両面で課題を抽出した。

今後は、実験値と理論モデルによる解析値との不一致を解消する努力が求められる。理論の面では、高励起核種の脱励起を記述する核反応モデルの高度化が鍵となる。実験の面では、測定で得られた核分裂片の飛行時間分布から質量数分布へと導出する手法を確立するとともに、核分裂片の陽子数分布測定も重要である。これらの課題は、核反応モデルを用いた詳細解析とともに核反応生成物の陽子数分布と質量数分布を同時に網羅的に取得することで克服できる可能性がある。我が国の理化学研究所 RI ビームファクトリ [4-3] やドイツの重イオン研究所 GSI [4-4] で用いられている逆運動学に基づく断面積測定法が、この課題克服に有望である。

3. 高励起状態の核分裂中性子に関する実験的研究（再委託先：京大）

原子力機構が行う高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究と連携して、FFAG 加速器の陽子ビームをビスマス (^{209}Bi) 標的に照射し、107 MeV 陽子入射による ^{209}Bi に対する核分裂中性子スペクトルのデータを取得した。取得したデータの統計精度に課題はあるものの、核反応モデルによる核分裂中性子スペクトルの解析結果は、実験不確かさの範囲内に収まることを示した。さらに、核反応モデルにおける、核反応が起きてから核分裂が発生するまで放出中性子数に関する課題を抽出した。この課題は、逆運動学に基づく断面積測定法により克服できる可能性がある。

4. 研究推進

研究代表者のもとで月に1回程度の定例ビデオ会議を実施し、これらの対応および各研究項目における研究内容について議論するとともに研究項目間の連携を密にして研究を進め

た。各研究項目の達成度を評価し、3年半にわたる研究を計画どおりに実施した。

以上、京大 FFAG 加速器の 107 MeV 陽子ビームを用いて、ADS 標的構成材の中性子生成 DDX と TTTY 測定、重核種に対する高エネルギー核分裂で発生する核分裂片分布および核分裂中性子数の測定を行い、ADS 開発に資する核反応データを取得した。さらに、取得した実験データと核反応モデル（理論モデル）による解析値との比較検討を行い、JQMD モデルの高度化に成功するとともに、核反応モデルの高度化に向けた課題を抽出した。

本研究成果は、ADS の早期実現に向けた核反応工学における技術的課題の解決と ADS 設計の信頼性向上に大きく貢献する。今後は、上で提案した加速器施設の利用や国外研究機関との連携を視野に入れ、各研究項目で明らかになった課題の克服に向けた取り組みが求められる。

参考文献

- [4-1] 明午伸一郎, 山口雄司, 岩元大樹, 400MeV – 3GeV 陽子における Al(p, xp) 反応の二重微分断面積 (DDX) の測定, 2; 400MeV 陽子を用いた試験, 日本原子力学会 2023 年春の年会, 東京大学.
- [4-2] 九州大学加速器・ビーム応用科学センター,
<https://www.cabas.kyushu-u.ac.jp/ffag/> (参照: 2023 年 3 月 31 日).
- [4-3] 理化学研究所仁科加速器化学研究センター,
<https://www.nishina.riken.jp/factory/RIBFfacility.html> (参照: 2023 年 3 月 31 日).
- [4-4] GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH,
https://www.gsi.de/en/about_us (参照: 2023 年 3 月 31 日).

用語解説

ガラス固化体 (vitrified radioactive waste)

ガラス固化体は、高レベル放射性廃液とガラス原料を混ぜて一体化して固めたもの。再処理の工程で使用済燃料から分離される高レベルの放射能をもつ廃液を、まず蒸発濃縮して容量を減らしたあと、ガラス熔融炉の中で溶かしたガラスと混ぜ合わせ、キャニスターと呼ばれるステンレス製容器に注入して、冷やして固める。ガラス固化体は、冷却のため専用の貯蔵施設で 30~50 年間冷却しながら貯蔵され、その後、搬出して 300 メートル以深の深い地層中に処分される。高レベル放射性廃棄物とも言う。

高レベル放射性廃棄物 (HLW: High Level Waste)

再処理の際に生じる高レベルの放射能を持つ廃液を高温のガラスと溶かし合わせて固体化したもの。ガラス固化体と同義。

加速器駆動核変換システム (ADS: Accelerator-Driven System)

核破砕反応により作り出された核破砕中性子源を利用して、核分裂の連鎖反応を未臨界状態で維持しながら、長寿命放射性核種であるネプツニウム、アメリシウムなどのマイナーアクチノイドを核変換するシステム。

陽子 (proton)

水素の原子核で、原子核を構成する粒子（核子）の一つ。電子の 1,836 倍の質量と、電気素量に相当する陽電荷を持つ。

加速器 (accelerator)

電子や陽子などの粒子を光の速度近くまで加速して高いエネルギーの状態を作り出す装置。原子核・素粒子の実験による基礎科学研究のほか、医療、新素材開発といった実用にも広く使われている。

臨界 (critical)

原子炉内の中性子数が一定の水準以上に達し、核分裂反応が持続的に進行する状態を指す。この状態になると核分裂連鎖反応が維持される。中性子実効増倍率 (k_{eff}) は、1 個の中性子が原子核と衝突した結果、どれだけの数の中性子が発生するかを表す指標であり、1 より大きい場合は原子炉内の中性子が増殖し（臨界超過）、1 より小さい場合は減衰する（未臨界）。中性子実効増倍率が 1 になると核分裂連鎖反応が維持される。

未臨界炉 (subcritical reactor)

核分裂反応を起こすために必要な中性子が減少し、核分裂連鎖反応が維持されなくなるような状態の原子炉。炉内で中性子が吸収されるか、外部からの中性子が不足するため、中性子が減少して核分裂反応が起こらなくなる。核分裂連鎖反応を維持するには、外部から中性子を供給し続ける必要がある。

マイナーアクチノイド (MA: Minor Actinoid)

周期表で原子番号 89 のアクチニウム (Ac) から 103 のローレンシウム (Lr) までの 15 の元素をアクチノイドと言い、全て放射性の同位元素である。このうちの超ウラン元素から Pu を除いたネプツニウム (Np)、アメリシウム (Am)、キュリウム (Cm)、バークリウム (Bk)、カリホルニウム (Cf)、アインスタイニウム (Es)、フェルミウム (Fm)、メンデレビウム (Md)、ノーベリウム (No)、Lr の 9 元素をマイナーアクチノイドと呼ぶ。

核破砕反応 (spallation reaction)

加速器などを用いて高エネルギーにまで加速した粒子を、水銀、鉛、タングステン、炭素等の標的に入射すると、高エネルギー陽子が標的中の原子核と激しく衝突し、そのエネルギーで標的の原子核を破砕する。破砕された原子核から中性子、中間子などの多数の 2 次粒子が放出される反応を核破砕反応と呼ぶ。

核破砕中性子源 (spallation neutron source)

核破砕反応により多量の中性を放出させ、それを種々の実験に利用するための中性子源。

中性子 (neutron)

陽子とともに原子核を構成する粒子 (核子) の一つ。陽子とほぼ同じ質量を持ち、電気的に中性である。

潜在的放射性毒性 (potential radiotoxicity)

放射性核種の量を人体への影響 (線量換算係数) で重みづけた指標で、放射エネルギー (単位: ベクレル) を被曝線量 (単位: シーベルト) に換算したもの。

核反応モデル (nuclear reaction model)

核反応現象を説明するための理論モデル。核反応過程は、入射粒子やそのエネルギー、標的原子核によって異なり極めて多彩なため、光学模型、統計模型、共鳴理論などの様々な物理モデルを組み合わせて説明される。

ビーム窓 (beam window)

ADS のビーム輸送装置の真空ダクトの末端の外側には、液体の鉛ビスマス共晶合金で満たされた核破砕標的がある。この鉛ビスマスが真空ダクトに流れ込まないようにする仕切りがビーム窓である。陽子ビームはビーム窓を通過して鉛ビスマス核破砕標的に入射する。陽子ビームの通過によりビーム窓は発熱するが、流動する鉛ビスマスによって冷却される。

核分裂反応 (fission reaction)

ウラン、トリウム、プルトニウムのような重い原子核が 2 つ以上の原子核に分裂する現象。1 核分裂当たり約 200 MeV のエネルギーが放出されるので原子力エネルギーとして利用される。核分裂のときに 2~3 個の中性子 (核分裂中性子) やガンマ線、ベータ線を放出する。

京都大学臨界集合体実験装置 (KUCA: Kyoto University Critical Assembly)

原子炉等規制法施行令によると、臨界実験装置は「炉心構造を容易に変更することができる

原子炉であって、核燃料物質の臨界量等当該原子炉の核特性を測定する用にもつぱら供するもの」と定義されている。英語では critical assembly (臨界集合体)、critical facility (臨界装置)、zero power reactor (ゼロ出力炉) などと言われているが、ほぼ同義語である。KUCA は複数炉心型の臨界実験装置であり、一式の制御駆動機構で3つの炉心(固体減速架台(A架台、B架台)及び軽水減速架台C架台)を運転することができる。1974年8月6日に初臨界になって以来、炉物理に関する様々な研究が行われてきた。

二重微分断面積 (DDX: Double-Differential cross(X)-section)

入射粒子が薄い標的に照射したときに発生する粒子の放出エネルギー・角分布で、通常、測定角に対する中性子エネルギースペクトルとして観測される。

厚い標的中性子収量 (TTNY: Thick Target Neutron Yield)

入射粒子が厚い標的に照射したときに発生する中性子の放出エネルギー・角分布で、通常、測定角に対する中性子エネルギースペクトルとして観測される。DDXが原子核固有の物理量であるのに対し、TTNYは標的の密度と形状を含んだ物理量を表す。

断面積 (cross section)

粒子の衝突・散乱過程において粒子どうしが相互作用する際に、ある特定の過程の起こる確率を表す量を断面積といい、面積の次元をもつ。分子、原子、原子核、素粒子などの反応で広く用いられている概念であり、考える過程によってさまざまな断面積が定義される。特に放射線と原子核のかかわる断面積を核反応断面積という。一般に断面積は σ で表し、単位はバーン (barn, b) である。1 barn は 10^{-24} cm^2 である。

電子ボルト (eV)

エネルギーの単位の一つで、1 eV は、電気素量を持つ荷電粒子が1 Vの電位差を抵抗なしに通過するときを得るエネルギー。1 eV は正確に $1.602176634 \times 10^{-19} \text{ J}$ と定義される。1,000 eV、1,000,000 eV 及び 1,000,000,000 eV は、便宜上それぞれ 1 keV、1 MeV 及び 1 GeV と表記される。

タンデム加速器施設 (tandem accelerator)

重イオンによる原子核物理、核化学、物性物理の基礎研究を目的として建設された原子力機構が保有するタンデム加速器施設。1993年に超伝導ブースター全系が完成し、研究で利用できる重イオン核種が大幅に拡大された。他の加速器に比べて、エネルギー可変が容易であり、精度が高い、ビーム広がり小さい、加速イオン種が豊富などの利点がある。

代理反応 (surrogate reaction)

実験的に観測可能な二つの核反応のうち、少なくとも一方が不明なものについて、代替となる核反応を用いてその反応の特性を推定する方法。代理反応は、核反応断面積やエネルギー分布などの特性を求めるために用いられる。例えば、重イオン線を用いた核反応では、反応断面積が小さく実験が困難な場合がある。このような場合、代理反応を用いて、求めたい反応の性質を推定することができる。代理反応には、類似した反応機構を持つ反応や、同じ反

応機構を持つが反応物質が異なる反応などが用いられる。しかし、代理反応を用いた推定には、代理反応と実際の反応との間の微小な違いによる誤差が生じることがある。そのため、代理反応を用いた推定結果には注意が必要である。

放射線標準施設 (FRS: Facility of Radiation Standards)

原子力機構が保有する放射線防護分野で国内最大規模の総合的な校正施設。各種の照射設備や加速器等が備えられ、中性子、ガンマ線、エックス線、ベータ線などの二次標準照射設備が整備されている。

液体有機シンチレータ (liquid organic scintillator)

有機溶媒中に、放射線が当たると蛍光を発する性質を持つ物質（シンチレータ）を溶解したもので、光電子増倍管に光学的に接続することにより放射線検出器として用いられる。他の中性子検出器に比べて検出効率、粒子弁別性能、使用時の簡便性等で優れており、数十 MeV までの中性子計測に広く利用されている。

光電子増倍管 (PMT: photomultiplier tube)

光電効果により放出された電子を増幅することにより、光に対して高い感度を有する光センサー。

ガンマ線 (γ -ray)

励起状態にある原子核が、より低いエネルギーの励起準位または基底準位になる際に放出される電磁波で、光子とも呼ばれる。

飛行時間法 (TOF method: time-of-flight method)

加速器で得られるパルスビームを標的に照射することによって放出されるガンマ線と粒子が標的から検出器までの距離を飛行して検出器に到達するまでの時間差から、粒子のエネルギースペクトルおよび断面積を測定する手法。

セシウム 137 (^{137}Cs : cesium 137)

原子番号 55 のアルカリ金属元素であるセシウムの同位体のひとつで人工放射性核種である。半減期は 30.2 年でベータ崩壊して $^{137\text{m}}\text{Ba}$ となり、662 keV のガンマ線を放出して安定な ^{137}Ba になる。

ガンマ線と物質との相互作用

ゲルマニウム半導体検出器などの放射線検出器を用いてガンマ線のエネルギースペクトルを計測すると、ガンマ線の持つすべてのエネルギーを吸収した場合の全吸収ピーク（光電ピーク）、検出器の中で一部のエネルギーが吸収されてできるコンプトン散乱スペクトル、検出器の外側に向かったガンマ線が周辺の物質と散乱を起して検出器に入射した結果生じる後方散乱スペクトル、内部転換に伴い、放射性核種の原子内の励起された電子が安定状態に遷移する際に発生する特性エックス線スペクトルが観測される。コンプトン散乱スペクトルは特定のエネルギーより低いエネルギー領域に現れ、この特定のエネルギーをコンプトン端と呼ぶ。

アメリカシウム 241 (^{241}Am : americium 241)

原子番号 95、半減期 432.2 年の放射性核種で、超ウラン元素の一つ。アルファ崩壊して ^{237}Np となる。アルファ線のエネルギーは 5.4 MeV。ガンマ線のエネルギーは非常に低く、60 keV である。

NIM 規格 (NIM standard: Nuclear Instrumentation Module standard)

米国原子力委員会 (AEC) において 1966 年に制定された放射線測定モジュール標準規格 TID-20893 に準拠した標準規格。この規格に準拠の回路は、NIM モジュールと呼ばれ、原子力関連、高エネルギー加速器、宇宙線研究、精密計測システムの構築などの研究分野で幅広く利用されている。

重陽子 (deuteron)

質量数 2 の水素の同位体である重水素の原子核で、陽子と中性子の 2 個の核子で構成される。陽子の記号を p と表すのに対して、重陽子は d を用いる。重水素は安定な核種で、天然の水素化合物に 0.014~0.015%含まれている。

トリチウム (tritium)

水素の同位体で、原子核が陽子 1 個と中性子 2 個からなる核種。日本語では三重水素と呼ばれ、 ^3H または T と表記される。半減期 12.3 年の放射性同位体で、18.6 keV のベータ線を放出する。宇宙線による核反応で生成するが、天然にはごく微量にしか存在しない。トリチウム原子核を三重陽子 (triton) と呼び、三重陽子の記号は t を用いる。

パイルアップ (pileup)

近い時間に発生したパルスが重なり合って、見かけ上一つのパルスになる現象。パイルアップにより検出事象の数え落としが生じるため、数え落とし補正を行う必要がある。

Bethe-Bloch (ベーテ・ブロッホ) の式 (Bethe-Bloch formula)

荷電粒子が物質中を通過する際に失うエネルギーの量を計算するための式。荷電粒子の速度、電荷、物質の密度、および電子密度に基づいて計算される。放射線物理学、核物理学、素粒子物理学などの分野で使用されている。

Veto (ベト) 検出器 (veto detector)

特定の種類の粒子を他の粒子と区別するために使用される放射線検出器。通常、主検出器の周囲または前方に設置し、目的の検出を妨害する可能性のある不要な粒子を検出する。veto 検出器によって生成された信号を分析することで、主検出器によって検知された粒子が目的のものなのか、それとも不要な粒子によって引き起こされた偽信号なのかを判断できる。宇宙線、粒子加速器、核物理学などの実験に使用される。

中性子フルエンス (neutron fluence)

単位面積の領域を通過する中性子の総数。単位は m^{-2} である。単位時間あたりの中性子フルエンスは中性子フルエンス率と呼ばれ、単位は $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ である。

レサジー (lethargy)

中性子が媒質中で衝突によって失う運動エネルギーの減少量を表す。 E_0 の運動エネルギーを持つ中性子が E に減少するときのレサジー u は次の式で定義される。

$$u = \ln \frac{E_0}{E} \quad (1)$$

エネルギーの上端 E_{upper} と下端 E_{lower} の間のエネルギー幅が $\Delta E = E_{\text{upper}} - E_{\text{lower}}$ で表されるのに対し、レサジー幅は

$$\Delta u = \ln \frac{E_{\text{upper}}}{E_{\text{lower}}} \quad (2)$$

で表される。

核分裂計数管 (fission chamber)

放射線計測器の一種で、その構造は、比例計数管とほぼ同じである。 ^{235}U 核分裂間の場合、電極に ^{235}U の酸化物 U_3O_8 (八酸化三ウラン) が塗布され、アルゴンガスが封入されている。中性子によって ^{235}U が核分裂を起こし、それによって生じた核分裂片の電離作用によってパルス信号を得る。 ^{235}U は常時アルファ線を出し測定上の問題となるが、アルファ線の行程は核分裂片よりも長いので、電極間隔を狭くしてこれを回避することができる。

プリアンプ (pre-amplifier)

電気信号を扱う機器の前段 (ないし入力段) に置かれるアンプ (増幅器)。前置増幅器とも呼ばれる。

核データ (nuclear data)

種々の核反応の起こる確率を表すデータ。放射性同位元素から放出される放射線の種類やエネルギー、原子核の励起状態を表す核構造データなども核データに含まれる。核データの推奨値をまとめたデータファイルを評価済み核データライブラリと呼ぶ。

放射能 (radioactivity)

単位時間当たりに壊変する原子数。単位は s^{-1} で、これを Bq (ベクレル) と呼ぶ。

半導体検出器 (semiconductor detector)

半導体を用いて作製される放射線検出器。検出器に使用される半導体には、シリコン、ゲルマニウム、化合物半導体 (GaAs、CdTe 等) などがある。測定原理は、ダイオードの整流方向と逆方向の電圧を印加して生じる放射線測定有効領域において放射線で生成された電子と正孔の対に基づく電流を取り出すことによる。半導体検出器では、一对の電子-正孔対を得るために必要なエネルギーが気体検出器に比べて小さく、結果的に優れたエネルギー分解能が得られる。主なものとしては、アルファ線、ベータ線などの荷電粒子測定のためのシリコン表面障壁型半導体検出器、ガンマ (エックス) 線測定のための高純度ゲルマニウム検出器などがある。

放射性崩壊 (radioactive decay)

放射性核種が放射線を放出したり、自発的に核分裂して、別の核種に変わる現象。崩壊の形式には原子核がアルファ粒子（ヘリウム原子核）を放出し別の核種に変わるアルファ崩壊、原子核の中の中性子が電子を出して陽子に変わるベータ崩壊、核異性体移転（ガンマ線または電子を放出）、軌道電子捕獲、自発核分裂、遅発中性子放出などがある。

半減期 (half-life)

放射性核種の数が放射性崩壊によってある時刻から半分になるまでの時間を半減期という。

永続平衡 (secular equilibrium)

親核種の半減期が娘核種の半減期よりも圧倒的に長ければ、親核種の崩壊が娘核種の量を決めるために、親核種の放射エネルギーと娘核種の放射エネルギーは等しくなり、親核種の半減期カーブに沿って時間と共に減衰してゆく。これを永続平衡と呼ぶ。

コバルト 60 (^{60}Co : cobalt 60)

コバルト（原子番号 27、原子量 58.93 の金属元素）の人工放射性核種の一つ。製法はコバルトを中性子照射することにより容易に得られ、また、適当な形に加工できる。ガンマ線源として使用され、厚さや密度を計る工業用測定器、食品の殺菌、がんの放射線治療、及び植物の品種改良などに広く利用されている。

飛程 (range)

荷電粒子が物質に入射して停止するまでの距離。

PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)

あらゆる物質中での様々な放射線挙動を核反応モデルや核データなどを用いて模擬するモンテカルロ計算コード。原子力分野で培った数多くの基盤技術を結集し、その技術を原子力のみならず放射線に関連する多様な研究分野に応用することを目的に、原子力機構が中心となって開発を進めています。放射線施設の設計、医学物理計算、放射線防護研究、宇宙線・地球惑星科学など、工学、医学、理学の様々な分野で国内外 4,000 名以上の研究者・技術者に利用されている。

半値全幅 (FWHM: full width at half maximum)

スペクトル分布の広がり程度の程度を表す指標で、スペクトルの極大値の半分の強度の 2 点間の間隔を表す。単に半値幅とも呼ばれる。

比例計数管 (proportional counter)

放射線計測器の一種で、カウント当りの全電離が最初の電離現象で生み出された電離に比例するよう印加電圧が調整された計数管である。印加電圧を調整することにより、放射線が計数管内のガスと衝突することによって生じた電離を、カウント当りの全電離が最初の電離現象で生み出された電離に比例させたものである。代表的なものに、 BF_3 （三フッ化ホウ素）比例計数管や ^3He （ヘリウム 3）比例計数管がある。

ガウス過程回帰 (GPR: Gaussian Process Regression)

確率的な回帰モデルの一種で、未知の関数の確率分布を推定する。これにより、不確実性を考慮した予測を行うことができる。機械学習、統計学、信号処理などの様々な分野で使用される。

^{252}Cf 中性子源 (^{252}Cf neutron source)

放射性核種 ^{252}Cf (半減期 2.65 年) の自発核分裂によって中性子を発生する中性子線源。工業計測、検査、分析などを中心に広く用いられている。

オシロスコープ (oscilloscope)

時間の経過と共に電気信号 (電圧) が変化していく周期的変化をリアルタイムに波形として画面に表示させ、電気信号の変化を観測できるようにした波形測定器。通常、画面表示の水平軸は時間を表し、垂直軸は電圧を表し、周期的な信号の表示に適している。もともとは陰極線管を用いて表示するブラウン管オシロスコープが一般的であったが、近年はデジタルオシロスコープが主流になっている。

核分裂片 (fission fragment)

核分裂によって生成される原子核。1回の核分裂で2個の核分裂片が生成される。核分裂片の質量数の分布は入射エネルギーや核分裂を起こす原子核によって異なる。

ビームダンプ (beam dump)

不要なビームを吸収する装置で、ビームラインの最下流側に設置される。ビームのエネルギー付与による発熱や放射線の発生を考慮してビームダンプの構成材と寸法が設計される。陽子ビームの場合、鉄、無酸素銅、コンクリートなどが構成材として用いられる。

量子分子動力学 (QMD: Quantum Molecular Dynamics)

核子レベルで原子核反応の挙動を確率論的な衝突と力学的な計算によってシミュレーションする手法。具体的には、核子が相互作用する力を計算して、その力に基づいて時間発展する核子の様子を計算する。これにより、核子の挙動やそれに関連した残留核や反応機構などを理解することができる。

逆運動学 (inverse kinematics)

原子核実験において核反応の進行方向を逆にして研究する手法。通常の運動学では、標的核は静止しており、陽子や中性子などの入射粒子が標的核に衝突する。一方、逆運動学では、標的核を高エネルギーに加速し、静止または低速で移動する入射粒子に向けて照射する。これにより、特定の反応経路や標的核の特性を調べることができる。

高周波加速空洞 (radio-frequency acceleration cavity)

ビームを加速するための電界を発生させる装置。円形加速器では、ビーム周回周波数の整数倍に相当する周波数の高周波電界を印加する。

位相安定性の原理 (the principle of phase stability)

一般にシンクロトロンは運動量の大小によって周回時間が異なるように設計されており、放っ

ておけば粒子集団の先頭と後部で運動量に偏りが生じる。ここへ周回周波数と同期した高周波電圧を印加すると、粒子の見る電圧が先頭と後部で差が生じ、結果的に運動量の広がりを補正するように働く。これを位相安定性の原理と呼ぶ。

同期運動量、同期エネルギー、同期位相 (synchronous momentum, energy, and phase)

印加する高周波加速装置の周波数に対応する運動量を同期運動量、そのエネルギーを同期エネルギーと呼ぶ。一周あたりの周波数の変化率に対応して同期エネルギーの変化率が決まるが、そのエネルギーは高周波電圧から供給される。 $dE = qV \sin \phi_s$ と書いたとき、 ϕ_s を同期位相と呼ぶ。

バンチ (bunch)

シンクロトロンを周回する粒子は、位相安定性の原理によって同期位相・同期エネルギーを中心とした振動を行い、そこに集団を作る。この粒子集団をバンチと呼ぶ。

キッカー電磁石 (kicker magnet)

ビームに対しパルス的な横方向の力を与える電磁石。京都大学の FFAG 加速器では、主リングからのビーム取り出しに用いられる。ビームの周回時間より速い立ち上がり時間を必要とする。当該リングでは $0.2 \mu\text{s}$ 以下の立ち上がりで励磁される。

セプタム電磁石 (septum magnet)

キッカー電磁石によって周回軌道を離脱したビームにさらに横方向の力を与えることで、円形加速器からビームを取り出す電磁石。

縦方向、横方向 (longitudinal, transverse)

縦方向は、荷電粒子がビームの進行方向に対して前後に動く方向。この方向の制御によって、ビームの速度やエネルギーを調整することができる。一方、横方向は、荷電粒子の進行方向に対して左右に動く方向。横方向の制御によってビームの集束や散乱を制御することができる。

Torr

Torr は圧力の単位の一つで、正確に $101325/760 \text{ Pa}$ と定義される。 $1 \text{ Torr} = 1 \text{ mmHg}$ である。

電極 (electrode)

放電電流を流す導体。電子が流入する電極をアノード (anode)、電子が流出する電極をカソード (cathode) と呼ぶ。

LEMO 規格

モジュラー型コネクタの規格の一つで、NIM 規格のようなモジュール式標準規格で前面パネルの端子として使用される。

ディレイライン (delay line)

電気信号の伝播を遅くする機能を持っている部品またはデバイス。