

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

交流高温超伝導マグネットと
共鳴ビーム取出しを応用した
加速器駆動核変換システム用
革新的円形加速器の先導研究開発

成果報告書

令和2年3月

国立大学法人 京都大学

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、国立大学法人京都大学が実施した平成 28 年度－令和元年度「交流高温超伝導マグネットと共鳴ビーム取出しを応用した加速器駆動核変換システム用革新的円形加速器の先導研究開発」の成果を取りまとめたものです。

目次

目次	i
表一覧	iii
図一覧	iii
概略	vi
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	
2.1 全体計画	2.1-1
3. 業務の実施内容及び成果	
3.1 交流高磁界を低消費電力で発生可能な高温超伝導マグネットの研究開発	
3.1.1 高温超伝導線の臨界電流特性の定式化【H28】	3.1-1
3.1.2 鉄ヨークの非線形磁気特性と超伝導線の非線形導電特性を考慮した 超伝導マグネットの交流損失評価技術の構築	
(1) 超伝導線経験磁界評価手法の確立【H28】	3.1-1
(2) 交流損失評価モデルの構築【H29】	3.1-2
3.1.3 低交流損失高温超伝導マグネットの設計	
(1) マグネットの交流損失定量化【H30】	3.1-3
(2) 交流損失を低減したマグネット設計確立【R1】	3.1-4
3.1.4 まとめ	3.1-13
3.2 低加速消費電力・高ビーム出力加速器システムの研究開発	
3.2.1 ビーム光学系の基本設計	
(1) 線形光学系の設計確立【H28】	3.2-1
(2) 非線形ビーム挙動の定量化【H29】	3.2-2
(3) 交流損失低減設計のビームへの影響の定量化【H30】	3.2-4
(4) 最適化された磁界でのビーム安定性の定量化【R1】	3.2-5
3.2.2 ビーム加速シナリオの詳細検討	
(1) 高周波運転パターンの確立【H28】	3.2-6
(2) 磁性体高周波特性の定量化【H29】	3.2-7
3.2.3 まとめ	3.2-7
3.3 高繰り返し運転共鳴ビーム取出し装置の研究開発	
3.3.1 共鳴ビーム取出しの概念検討【H28】	3.3-1
3.3.2 共鳴励起用多極マグネットの基本設計	
(1) 2次元多極磁界成分の確定【H28】	3.3-2
(2) 多極磁界の3次元分布影響の定量化【H29】	3.3-2

3.3.3 セプタムマグネットの基本設計	
(1) セプタムマグネット基本設計の確立【H30】	3.3-2
(2) 取出しビーム特性の定量化【R1】	3.3-3
3.3.4 まとめ	3.3-3
3.4 研究推進	
3.4.1 チーム会議による研究進捗管理と研究推進【H28-R1】	3.4-1
4. 結言	
4.1 成果のまとめ	4-1
4.2 目標達成度・成果の新規性・研究の効果	4-1
4.3 今後の展開・将来の見通し	4-2
用語一覧	用語一覧-1

表一覧

	項
表 1-1	各種加速器の比較…………… 1-2
表 2. 1-1	年度別全体計画…………… 2. 1-1
表 3. 1-1	設計された加速器システムの諸元…………… 3. 1-14
表 3. 1-2	機能分離型マグネット及び機能結合型マグネットを構成する高温超伝導 コイルの諸元…………… 3. 1-15
表 3. 1-3	設計された形状の異なるマグネットの諸元…………… 3. 1-17
表 3. 1-4	マグネット 1 からマグネット 6 の電力消費の比較…………… 3. 1-19
表 3. 1-5	マグネット消費電力のまとめ…………… 3. 1-20
表 3. 1-6	運転温度が 70 K の高温超伝導コイルの諸元…………… 3. 1-20
表 3. 1-7	運転温度が異なるマグネット 6 とマグネット 7、8 の電力消費の比較…………… 3. 1-21
表 3. 1-8	解析対象とする CORC ケーブルの諸元…………… 3. 1-22
表 3. 1-9	概念設計した加速器システム（最終的な設計）の諸元…………… 3. 1-25
表 3. 1-10	概念設計した高温超伝導マグネットの諸元…………… 3. 1-25
表 3. 2-1	ビーム基本仕様…………… 3. 2-9
表 3. 2-2	機能結合型マグネット 32 台を使った加速器の基本パラメータ…………… 3. 2-9
表 3. 2-3	機能結合型マグネット 20 台を使った加速器の基本パラメータ…………… 3. 2-12
表 3. 2-4	高周波加速装置基本パラメータ…………… 3. 2-15
表 3. 3-1	6 極マグネットの多極磁界成分…………… 3. 3-6
表 4. 1-1	設計された加速器の諸元…………… 4-1
表 4. 3-1	プロトタイプ C-ADS の諸元…………… 4-3

図一覧

	項
図 3. 1-1	マグネットの模式図…………… 3. 1-14
図 3. 1-2	超伝導マグネットの交流損失評価方法…………… 3. 1-14
図 3. 1-3	高温超伝導線の臨界電流密度 J_c の磁界依存性…………… 3. 1-15
図 3. 1-4	機能分離型マグネットを構成する高温超伝導コイルの電磁界解析結果…………… 3. 1-16
図 3. 1-5	機能結合型マグネットを構成する高温超伝導コイルの電磁界解析結果…………… 3. 1-16
図 3. 1-6	解析対象の高温超伝導マグネット断面の概念図…………… 3. 1-17
図 3. 1-7	スタックケーブルで巻かれたコイル…………… 3. 1-17
図 3. 1-8	一般的な電力機器における磁化履歴（灰色）と解析条件における 磁化履歴（黄色）…………… 3. 1-18
図 3. 1-9	鉄シートの概念図…………… 3. 1-18
図 3. 1-10	マグネット 1 からマグネット 3 を対象とした電磁界解析結果…………… 3. 1-18
図 3. 1-11	マグネット 4 からマグネット 6 を対象とした電磁界解析結果…………… 3. 1-19
図 3. 1-12	マグネット 1 からマグネット 6 までのコイル全体での交流損失の 時間変化…………… 3. 1-19

図 3.1-13	マグネット 6 (65 K) とマグネット 7、8 (70 K) を対象とした 電磁界解析結果	3.1-20
図 3.1-14	マグネット 6 (65 K) とマグネット 7、8 (70 K) のコイル全体での 交流損失の時間変化	3.1-21
図 3.1-15	CORC ケーブルで巻かれたコイルの断面図	3.1-21
図 3.1-16	CORC ケーブルにおける長手方向外部磁界分布の仮定	3.1-22
図 3.1-17	コイル断面における解析対象とする CORC ケーブルの選択	3.1-22
図 3.1-18	CORC ケーブルの 3 次元交流損失密度分布	3.1-23
図 3.1-19	3 次元損失分布の展開図及び電流流線図	3.1-23
図 3.1-20	CORC ケーブル一本位置周期分における交流損失の時間変化	3.1-23
図 3.1-21	高温超伝導集合導体	3.1-24
図 3.1-22	最終的に概念設計した高温超伝導マグネット	3.1-26
図 3.2-1	機能結合型マグネット 32 台を使った加速器	3.2-9
図 3.2-2	機能結合型マグネット 32 台を使った加速器の色収差補正後の 安定軌道評価結果	3.2-10
図 3.2-3	機能結合型マグネットの鉄芯構造	3.2-10
図 3.2-4	3 次元磁界計算から得られた磁界分布	3.2-11
図 3.2-5	機能結合型マグネットを使った加速器における位相空間構造 (飽和の影響あり)	3.2-11
図 3.2-6	機能結合型マグネット 20 台を使った加速器	3.2-12
図 3.2-7	線形補間の説明図	3.2-13
図 3.2-8	長直線部中心でのビーム位相空間構造	3.2-13
図 3.2-9	主マグネットの端部での多極磁界成分を考慮した ビームシミュレーションのサバイバルプロット	3.2-13
図 3.2-10	高周波加速装置の運転パターン	3.2-14
図 3.2-11	加速終了時の縦方向位相空間での粒子分布	3.2-14
図 3.2-12	試験空洞による高周波電場測定の様子	3.2-14
図 3.2-13	試験空洞に機能結合型リングの高周波パターンを入力したときに発生した 高周波の周波数	3.2-15
図 3.3-1	ベータトロン振動の共鳴を用いたビーム取出しの概念図	3.3-4
図 3.3-2	半整数共鳴励起時の水平方向位相空間構造	3.3-4
図 3.3-3	3 次共鳴励起時の水平方向位相空間構造	3.3-5
図 3.3-4	マグネット端部磁界影響の計算体系の評価に用いた 6 極マグネットの 3 次元モデル	3.3-5
図 3.3-5	6 極マグネットの磁束密度分布の s 方向への射影	3.3-5
図 3.3-6	ビーム取り出し軌道	3.3-6
図 3.3-7	マスレスセプタムマグネット断面図	3.3-6
図 3.3-8	セパトリティクスの外に出た粒子の軌跡	3.3-7
図 3.3-9	取出し過程での位相空間構造	3.3-7

図 4. 1-1	設計された加速器及び加速器を構成する要素.....	4-1
図 4. 3-1	高繰り返しシンクロトロンを用いた ADS 開発のロードマップ.....	4-3

概略

〔研究の背景〕

軽水炉運転後に生じる使用済燃料の処分は、全世界的に取り組まねばならない喫緊の課題である。日本では平成 26 年 4 月時点で約 17,000 トンの使用済燃料が保管中であり、1 GWe の軽水炉を 1 年間稼働すると 20 トンの使用済燃料が発生する。仮に日本の電力需要(2030 年度予想)の 15%を原子力発電で賄おうとすると、このクラスの軽水炉が 20 基(20 GWe)必要となり、年間 400 トンの使用済燃料が発生する。1 トンの使用済燃料の中には 1 kg のマイナーアクチノイド(以下 MA)が含まれる。つまり、20 GWe の軽水炉群を 1 年間稼働すると 400 kg の MA が生じることになる。MA には半減期が 200 万年に及ぶものもあり、使用済燃料から生じる MA を含んだ高レベル放射性廃棄物の経口摂取による潜在的毒性が、天然ウランと同程度まで減衰するのに要する時間は約 1 万年で、高レベル放射性廃棄物の処分を難しくする一因となっている。

加速器駆動核変換システム(以下 ADS: Accelerator Driven System)では、加速器によって生成した高エネルギー陽子を鉛ビスマスなどのターゲットに照射し核破砕反応を起こし、核破砕反応によって発生した高エネルギー中性子を未臨界炉心において核分裂反応により増倍させる。炉心に MA を含んだ燃料を装荷しておくことにより、高エネルギー中性子により長寿命核を安定核や短寿命核に変換できる。このように、ADS を用いれば、軽水炉による使用済燃料中の長寿命の MA を安定核や短寿命核に変換し、潜在的毒性の減衰時間を一万年から数百年に短縮できる。もって、使用済燃料の処分に ADS は大きく寄与し得る。

〔解決すべき課題〕

ADS の実現のためには、原子炉工学面での課題に加え、高エネルギー・大電流の陽子ビームを、安定に高い信頼性で、高効率で供給する、コンパクトな加速器の実現が解決すべき課題として挙げられる。

これまでの日本における ADS の概念検討では、陽子を加速するための高周波加速空洞を直線状に多数配置した線形加速器が主に想定されてきたが、線形加速器には多数の高周波加速装置が必須で、

- ・ 高周波加速装置が 1 台故障するとビームが停止するため、ビーム停止の頻度が高くビームの安定供給の点で信頼性が低い
- ・ 加速器全体の設置面積(特に敷地の長さ)が大きくなってしまふ

という解決すべき課題が存在する。円形加速器は線形加速器に比べてコンパクトであるが、サイクロトロンでは高エネルギーの陽子ビームを得ることが難しく、通常の繰り返し遅いシンクロトロンでは大電流の陽子ビームを得ることが難しい。また、固定磁界強集束加速器(FFAG 加速器)は、高エネルギー・大電流の陽子ビームの取出しの実績がない。

〔本研究の目的〕

核変換により放射性廃棄物の有害度を低減する加速器駆動核変換システムの実用化に向けて、小型・低消費電力で、安定した陽子ビームを原子炉に供給できる革新的円形加速器の実現を目指し、そのフェージビリティを示すこと(プロトタイプ開発の見通しを確立すること)を本研究の目的とする。具体的かつ定量的な全体目標として、1.5MW(ビームエネルギー1.5GeV、ビーム電流 1mA)、消費電力 5.0MW の加速器駆動核変換システム用円形陽子加速器の実現見通し確立を掲げる。

小型・低消費電力で、安定した陽子ビームを原子炉に供給できる ADS 用革新的円形加速器のプロトタイプ開発(製作)の基盤構築(フィージビリティ提示)という効果により、プロトタイプ・実用加速器、プロトタイプ ADS・実用 ADS の開発を可能にし、プロトタイプ ADS(加速器ビームパワー1.5 MW、原子炉熱出力 40 MW)と実用 ADS(加速器ビームパワー30 MW、原子炉熱出力 800 MW)で、それぞれ年間 2kg(100MWe の軽水炉を 1 年間稼働したときの排出量)、40kg(2GWe の軽水炉群を 1 年間稼働したときの排出量)のマイナーアクチノイドの核変換処理による放射性廃棄物減容・有害度低減に寄与する。

[本研究の実施内容]

本研究では、高エネルギー・大電流の陽子ビームを、安定に高い信頼性で、高効率で供給する、コンパクトな革新的円形加速器の候補として、高繰り返しシンクロトロンに着目した。

少数の高周波加速装置のみで高エネルギーまで加速可能なシンクロトロンは線形加速器に比べコンパクトで安定なビームの供給が可能であるが、通常のゆっくりした繰り返し運転ではビーム電流を大きくできず、また、銅線を用いたマグネットを用いたのでは消費電力が大きくなってしまふ。このような欠点を交流高温超伝導マグネットと共鳴ビーム取出しを応用した高繰り返し運転により克服する見通しを立てるために、交流高磁界を低消費電力で発生可能な高温超伝導マグネット、高繰り返し運転共鳴ビーム取出し装置、それらを用いた低加速消費電力・高ビーム出力加速器システムのフィージビリティスタディを実施した。

(1) 交流高磁界を低消費電力で発生可能な高温超伝導マグネットの研究開発

交流損失の理論的評価に必須の情報である、高温超伝導線の臨界電流密度の磁界(大きさ・方向)・温度依存性を、既存の実験データから定式化した。高温超伝導マグネットにおける交流損失を理論的に評価するため、前述の定式化された超伝導線の非線形導電特性と鉄ヨークの非線形磁気特性を考慮した数値電磁界解析手法を構築した。構築した数値電磁界解析手法により、マグネット内においてコイル形状と鉄ヨーク形状によって決定される交流経路磁界のもとで交流電流を輸送する 3 次元形状コイルに巻かれた超伝導線の交流損失を評価する理論モデルを構築した。構築した理論モデルを用い、交流損失を低減しつつ、必要な磁界を発生するように超伝導コイル・鉄ヨーク形状の最適化を進めた。また、高温ほど高くなる冷却システムの効率と、低温ほど高くなる臨界電流密度を考慮した運転温度の最適化を行い、高温超伝導コイルを冷却するのに要する消費電力低減という観点からマグネット設計の最適化を図った。その結果、銅コイルを用いたマグネットに比べて消費電力を大幅に低減した高温超伝導マグネットの概念設計に成功した。

(2) 低加速消費電力・高ビーム出力加速器システムの研究開発

本研究では、機能結合型マグネットを使った加速器と機能分離型マグネットを使った加速器の 2 種類の設計検討を行った。その結果、機能結合型マグネットを使った加速器を本研究の標準設計として採用することとした。機能分離型マグネットを使った加速器では、主 4 極マグネット並びに色収差補正用 6 極マグネットを独立に導入する必要があるが、これらの消費電力がリング全体の消費電力に対して主要な割合を占めてしまうことが、機能結合型マグネットを使った加速器を標準設計として採用した主要な理由である。

機能結合型マグネットを使った加速器について、研究項目(1)a「低交流損失高温超伝導マグネットの設計」との間でフィードバックを繰り返し、最適化された超伝導コイル・鉄ヨーク形状により発生する磁界分布を用いて、ビームシミュレーションにより、ビームの安定性を評価した。具体的には、マグネット本体部分で発生する 2 極、4 極、6 極磁界成分に加え、磁極端部で発生する漏洩磁界により発生する多極成

分を考慮したビームシミュレーションを行った。この結果から、想定するビームダクトに対し、十分大きな動的口径が得られることを確認し、低加速消費電力かつ高ビーム出力の高繰り返しシンクロトロン の概念設計に成功した。

(3) 高繰り返し運転共鳴ビーム取出し装置の研究開発

時間的に変化する、メインマグネット、共鳴励起用多極マグネット、及び高周波加速装置の周波数及び電圧パターン、さらにセプタムマグネットの磁界を反映させたビームシミュレーションを実施し、最終的な取出し効率、及び取出し後のビーム特性の評価を実施した。これらの評価・検討を通して、高繰り返しシンクロトロンに対して、高繰り返し運転共鳴ビーム取出しを適用できることを理論的に明らかにした。

(4) 研究推進

チーム会議を定期的に行い、チームメンバーからの報告に基づいて研究代表者が研究推進の管理を実施し、業務項目間の連携のための情報交換を行った。

[本研究の成果（特に世界初、国内初等アピールすべき成果）]

「交流高磁界を低消費電力で発生可能な高温超伝導マグネットの研究開発」に関しては、高温超伝導線 で巻かれたコイルと鉄ヨークからなるマグネットの、コイルにおける交流損失を 3 次元数値電磁界解析により評価することが可能となった。この解析技術により、銅を使った場合に比べ、高温超伝導を使うことでコイルの損失を約 10 分の 1 にできることを明らかにした。さらに、電流密度が高くコンパクトな高温超伝導コイルを利用することで鉄ヨーク体積を低減でき、鉄ヨークの鉄損も低減できる。最終的に、コイルの高温超伝導化によって、加速器全体のマグネットの損失、すなわち消費電力を約 3 分の 1 にすることができることを数値電磁界解析によって確認した。これまで ADS 用加速器として主に想定されていた線形加速器は、設置面積（特に敷地の長さ）が大きくなってしまいうという欠点を抱えていた。高繰り返しシンクロトロンによって、この欠点を回避しながら大電流高エネルギーの陽子ビームを実現することは可能であるが、銅コイルを使用したマグネットで構成された高繰り返しシンクロトロンはマグネットの消費電力が大きく、ADS 用加速器として検討の俎上に上げられていなかった。本研究の成果は、高温超伝導コイルと鉄ヨークを組合せた交流高温超伝導マグネットの適用によって高繰り返しシンクロトロン の低消費電力化を図り、ADS に適用する見通しを得たという点において世界初のものであり、ADS の実用化に向けて設置面積が小さく魅力的な高繰り返しシンクロトロンを議論の対象とする点で画期的である。

「低加速消費電力・高ビーム出力加速器システムの研究開発」に関しては、平成 28 度から検討してきた機能結合型マグネットを使った加速器に対し、研究項目(1)a「低交流損失高温超伝導マグネットの設計」との間でフィードバックを繰り返し、最適化された超伝導コイル・鉄ヨーク形状により発生する磁界分布を用いて、ビームシミュレーションにより、ビームの安定性を評価した。具体的には、マグネット本体部分で発生する 2 極、4 極、6 極磁界成分に加え、磁極端部の漏洩磁界により発生する多極成分を考慮したビームシミュレーションを行った。その結果、十分広いビーム安定領域を確保できることを確認した。今回本研究で開発したビームシミュレーション並びにビーム安定性評価手法は、この分野で今後広く用いられるものとする。

「高繰り返し運転共鳴ビーム取出し装置の研究開発」に関しては、時間的に変化する、メインマグネット、共鳴励起用多極マグネット、及び高周波加速装置の周波数及び電圧パターン、さらにセプタムマグネットの磁界を反映させたビームシミュレーションを実施した。取出し効率、及び取出し後のビーム特性の評価を実施し、高繰り返し運転での共鳴ビーム取出しが可能であることを示した。100 Hz という高繰り返し

運転での共鳴ビーム取出しはこれまでに例がなく、この手法を用いることにより、取出しビームのパルス幅を長くすることが可能となる。これにより、瞬間的なビームパワーを抑えることが可能となり、ビーム窓の熱ストレスによるダメージを低減することが期待される。ビーム窓とは加速後のビーム輸送系と炉心内部を循環する中性子発生用の液体ターゲットを分離する装置で、このビーム窓の熱ストレスを抑えることが ADS 技術開発の重要な課題のひとつである。本研究で検証された共鳴ビーム取出しは、ビーム窓に関する技術課題に対する解決策となり得るものである。

以上の三つの研究開発を通して、本研究では、ADS の実用化に向けて、従来検討されてきた線形加速器に代わる、小型・低消費電力で、安定した陽子ビームを原子炉に供給できる革新的円形加速器として、高繰り返しシンクロトロンへのフィージビリティを提示した。すなわち、交流高温超伝導マグネットと共鳴ビーム取出しを応用し、ビームパワー1.5MW(ビームエネルギー1.5GeV、ビーム電流 1mA)、消費電力4.1MW という目標値を上回る ADS 用高繰り返しシンクロトロンの概念設計に成功した。

[今後の展開、将来の見通し]

本研究開発では、交流高温超伝導マグネットと共鳴ビーム取出しを応用した、消費電力を抑えた高エネルギー・大電流の ADS 用高繰り返しシンクロトロンの概念設計を提示することに成功した。線形加速器に比べて、高繰り返しシンクロトロンは、信頼性が高く、設置面積が小さいという点で優位である。後者は、ADS の立地の制約の緩和につながる。また、同じく円形加速器であるサイクロトロンに比べて、高繰り返しシンクロトロンは、高エネルギーの陽子ビームが得られるという点で優位である。

交流高温超伝導マグネットに関しては、コイル製作に必要な高温超伝導線の技術は実用域に達しつつあるので、これを用いた集合導体によって高温超伝導コイルを構成することは可能である。この高温超伝導コイルをクライオスタットと呼ばれる液体窒素を貯める低温容器に収納し、鉄ヨークと組み合わせた、交流高温超伝導マグネットのプロトタイプ製作を通じた要素技術の実証が次の段階の研究開発として期待される。

高繰り返し運転共鳴ビーム取出しに関しては、加速器において実証実験を行い、ビームパルスの時間構造に関するデータを取得し、ビーム窓開発の基礎データを提供することが次の段階の研究開発として期待される。

また、上述のような超伝導マグネット技術、加速器技術に加えて、高繰り返しシンクロトロンとの適合性の観点に焦点を絞った ADS の原子炉技術の検討も次の段階の研究開発においては必須である。

本研究開発と並行して、京都大学、日本原子力研究開発機構、物質・材料研究機構の研究者で、2017年2月から21回にわたり(2020年3月時点)、「ADS・円形加速器・超伝導に関する勉強会」を開催し、上述したような、原子炉技術、加速器技術、超伝導技術に関する情報交換と研究開発課題の抽出を進めてきた。本研究開発の成果、同勉強会の成果を踏まえて、原子炉技術の研究者、加速器技術の研究者、超伝導技術の研究者が協力し、次の段階の研究開発に進むことが期待される。

1. はじめに

核変換により放射性廃棄物の有害度を低減する加速器駆動核変換システム(ADS: Accelerator Driven System)の実用化に向けて、従来検討されてきた線形加速器に代わる、小型・低消費電力で、安定した陽子ビームを原子炉に供給できる革新的円形加速器の実現を目指し、そのフィージビリティを示すこと(プロトタイプ開発の見通しを確立すること)を本研究の目的とする。具体的かつ定量的な全体目標として、1.5MW(ビームエネルギー1.5GeV、ビーム電流 1mA)、消費電力 5.0MW の加速器駆動核変換システム用円形陽子加速器の実現見通し確立を掲げる。

小型・低消費電力で、安定した陽子ビームを原子炉に供給できる ADS 用革新的円形加速器のプロトタイプ開発(製作)の基盤構築(フィージビリティ提示)という効果により、プロトタイプ・実用加速器、プロトタイプ ADS・実用 ADS の開発を可能にし、プロトタイプ ADS(加速器ビームパワー1.5 MW、原子炉熱出力 40 MW)と実用 ADS(加速器ビームパワー30 MW、原子炉熱出力 800 MW)で、それぞれ年間 2kg(100MWe の軽水炉を 1 年間稼働したときの排出量)、40kg(2GWe の軽水炉を 1 年間稼働したときの排出量)のマイナーアクチノイドの核変換処理による放射性廃棄物減容・有害度低減に寄与する。

背景として、軽水炉運転後に生じる使用済燃料の処分が、全世界的に取り組まねばならない喫緊の課題であることが挙げられる。日本では平成 26 年 4 月時点で約 17,000 トンの使用済燃料が保管中であり、1 GWe の軽水炉を 1 年間稼働すると 20 トンの使用済燃料が発生する。仮に日本の電力需要(2030 年度予想)の 15%を原子力発電で賄おうとすると、このクラスの軽水炉が 20 基(20 GWe)必要となり、年間 400 トンの使用済燃料が発生する。1 トンの使用済燃料の中には 1 kg のマイナーアクチノイド(以下 MA)が含まれる。つまり、20 GWe の軽水炉群を 1 年間稼働すると 400 kg の MA が生じることになる。MA には半減期が 200 万年に及ぶものもあり、使用済燃料から生じる MA を含んだ高レベル放射性廃棄物の経口摂取による潜在的毒性が、天然ウランと同程度まで減衰するのに要する時間は約 1 万年で、高レベル放射性廃棄物の処分を難しくする一因となっている。ADS を用いれば、軽水炉による使用済燃料中の長寿命の MA を安定核や短寿命核に変換し、潜在的毒性の減衰時間を一万年から数百年に短縮でき、ADS は使用済燃料の処分に大きく寄与し得る。

ADS 用の陽子加速器は、高エネルギー・大電流の安定した陽子ビームを原子炉に供給しなければならない。従来、我が国では、高エネルギー・大電流の陽子ビームを生成できる線形加速器が主に検討されてきたが、線形加速器は多数の高周波加速装置が必要であることから安定した陽子ビームの供給に難があり、また、敷地面積が大きくなるという欠点があった。サイクロトロンやシンクロトロンといった円形加速器は、コンパクトで安定した陽子ビームを供給できる利点を有しているが、前者は高エネルギーの陽子ビームが得られないこと、後者は大電流が得られないことという、ADS 用加速器としては大きな欠点を有している。これらの加速器の比較を表 1-1 に示す。本研究では、高繰り返しシンクロトロンという加速器に着目する。この加速器は、円形加速器であるためコンパクトで、さらに、高エネルギーかつ大電流の陽子ビームを安定に供給できる可能性がある。一方、マグネットの交流運転が必要で超伝導化によるマグネット消費電力低減が困難であること、さらに長期連続運転で安定したビーム取出しが困難であることといった欠点もあり、それら克服が ADS に応用するためには必要である。

本研究開発は、交流高温超伝導マグネットと共鳴ビーム取出しを応用することにより、これらの欠点を

克服する ADS 用陽子加速器としての高繰り返しシンクロトロン(RCS: Rapid Cycling Synchrotron)のフェージビリティスタディである。具体的には、交流高磁界を低消費電力で発生可能な高温超伝導マグネット、並びに高繰り返し運転共鳴ビーム取出し装置の実現可能性を理論的に見極め、これらを用いた高繰り返しシンクロトロンの概念設計を行った。

本文「3. 業務の実施内容及び成果」においては、

- ・3.1 交流高磁界を低消費電力で発生可能な高温超伝導マグネットの研究開発
- ・3.2 低加速消費電力・高ビーム出力加速器システムの研究開発
- ・3.3 高繰り返し運転共鳴ビーム取出し装置の研究開発

と三節に分けて、研究開発内容を詳述する。また、それぞれの節の成果は、「3.1.4 まとめ」、「3.2.3 まとめ」、「3.3.4 まとめ」に要約し、その部分だけを読んでも理解できる構成となるよう努めた。さらに、研究開発全体の成果の概略、並びに、今後の展開・将来の見通しを、「4. 結言」にまとめている。

表 1-1 各種加速器の比較

加速器	利点	欠点
線形加速器	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高エネルギー ・ 大電流 ・ ビームを曲げるためのマグネットが不要 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 敷地面積大(～600 m) ・ 高周波加速装置多(→ビーム停止の頻度が高くなり、ビームの安定供給の点で信頼性低下)
サイクロトロン	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大電流(> 1 mA) ・ コンパクト ・ 高周波加速装置少 ・ ビームを曲げて周回させるマグネットの消費電力低減のための超伝導化が容易 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高エネルギー化が困難
シンクロトロン	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高エネルギー(> 1GeV) ・ コンパクト ・ 高周波加速装置少 ・ ビームを曲げて周回させるマグネットの消費電力低減のための超伝導化が容易 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大電流化が困難
高繰り返しシンクロトロン(RCS)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高エネルギー(> 1GeV) ・ 大電流(> 1 mA) ・ コンパクト ・ 高周波加速装置少 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ビームを曲げて周回させるマグネットの消費電力低減のための超伝導化が、交流運転のため困難 ・ 長期連続運転で安定したビーム取出しが困難

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全体計画図を表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 年度別全体計画

項目	年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	平成 31 年度
1. 交流高磁界を低消費電力で発生可能な高温超伝導マグネットの研究開発	(1) 高温超伝導線の臨界電流特性の定式化	高温超伝導線の臨界電流特性の定式化 ←→			
	(2) 鉄ヨークの非線形磁気特性と超伝導線の非線形導電特性を考慮した超伝導マグネットの交流損失評価技術の構築	超伝導線経験磁界評価手法の確立 ←→	交流損失評価モデルの構築 ←→		
	(3) 低交流損失高温超伝導マグネットの設計			マグネットの交流損失定量化 ←→	交流損失を低減したマグネット設計確立 ←→
2. 低加速消費電力・高ビーム出力加速器システムの研究開発	(1) ビーム光学系の基本設計	線形光学系の設計確立 ←→	非線形ビーム挙動の定量化 ←→	交流損失低減設計のビームへの影響の定量化 ←→	最適化された磁界でのビーム安定性の定量化 ←→
	(2) ビーム加速シナリオの詳細検討	高周波運転パターンの確立 ←→	磁性体高周波特性の定量化 ←→		
3. 高繰り返し運転共鳴ビーム取出し装置の研究開発	(1) 共鳴ビーム取出しの概念検討	共鳴取出し方式の確立 ←→			
	(2) 共鳴励起用多極マグネットの基本設計	2次元多極磁界成分の確定 ←→	多極磁界の3次元分布影響の定量化 ←→		
	(3) セプタムマグネットの基本設計			セプタムマグネット基本設計の確立 ←→	取出しビーム特性の定量化 ←→
4. 研究推進	(1) チーム会議による研究進捗管理と研究推進	チーム会議の開催(2か月ごと) ←→	チーム会議の開催(2か月ごと) ←→	チーム会議の開催(2か月ごと) ←→	チーム会議の開催(2か月ごと) ←→
		まとめ・評価 ◆	中間取りまとめ・評価 ◆	まとめ・評価 ◆	最終取りまとめ・評価 ◆

3. 業務の実施内容及び成果

3.1 交流高磁界を低消費電力で発生可能な高温超伝導マグネットの研究開発

3.1.1 高温超伝導線の臨界電流特性の定式化【H28】

実用的な高温超伝導線には、ビスマス銅酸化物多芯テープ線と希土類銅酸化物薄膜テープ線がある。それらの超伝導線についてのこれまでの臨界電流測定結果、文献データ、並びに、超伝導線メーカーの技術資料等から、高温超伝導線の導電特性(電界-電流密度特性)の経験磁界の大きさ・角度、温度依存性のデータを収集し、Kim モデル・パーコレーション遷移モデルに収集データをフィッティングすることで、経験磁界の大きさ・角度、温度の関数としての臨界電流密度を定式化した。

Kim モデルによる定式化では、臨界電流密度 J_c の経験磁界の大きさ・角度、温度依存性に対するフィッティングを行った。高温超伝導線の非線形導電特性を考慮した電磁界解析において Kim モデルを使用する場合には、以下の式で表されるべき乗則により与えられる電界 E -電流密度 J 特性が用いられる。

$$E = E_0 \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (3.1-1)$$

この定式化は物理的背景の無い経験則であるが、簡便であることから広く用いられる。一方、パーコレーション遷移モデルは高温超伝導線内部の物理現象に立脚したモデルであり、これによる定式化では、経験磁界の大きさ・角度、温度の全てをパラメータとして高温超伝導線の電界-電流密度特性を定式化する。

3.1.2 鉄ヨークの非線形磁気特性と超伝導線の非線形導電特性を考慮した超伝導マグネットの交流損失評価技術の構築

(1) 超伝導線経験磁界評価手法の確立【H28】

超伝導マグネットとして、室温部に鉄ヨークを置き、鉄磁極形状の精密設計により加速器に必要な高精度の磁界分布を発生し、低温容器内に設置した超伝導コイルによって高い起磁力を得るスーパーフェリックマグネット(図 3.1-1(a))を対象として研究開発を実施した。これにより、従来の銅コイルを用いたマグネット(図 3.1-1(b))と比較して低消費電力・小型化を実現したマグネット設計が可能となる。磁束の相当部分を鉄ヨークの中に閉じ込めることにより超伝導線の経験磁界を抑え、交流磁界を低減した。また、高温超伝導コイルは、高温超伝導線をスタックし、転位を施した形状をもつケーブルによって構成されているとして検討した。

マグネットの交流損失を電磁界解析によって評価するためには、図 3.1-2 のフローチャートに示すように、マグネット内の超伝導線が経験する磁界分布を得る必要がある。特に、非線形磁気特性をもつ鉄ヨークが存在することにより、この磁界分布は複雑に変化する。そこで、電磁界解析ソフトウェア Opera(TOSCA)を利用しての磁界計算によって鉄ヨークが超伝導線に対して発生する磁界分布データを得る。具体的には、鉄ヨーク及びコイルが存在するときに超伝導線が経験する磁界分布から、コイルのみが存在するときに超伝導線が経験する磁界分布を差し引くことにより、鉄ヨークが超伝導線に対して発生する磁界分布データを得る。この磁界分布を、超伝導コイルが経験する外部磁界分布として超伝導線の非線形導電特性を考慮した電磁界解析を行うことができるプログラムに入力として与えることで、交流損失を評価することが可能になる。磁界分布のプ

プログラムへの受け渡しの際には、Opera (TOSCA)からは任意のコイル断面における離散化された二次元磁界分布を用いることとした。別途、断面内磁界分布を補間する変換プログラムを作成し、この出力データを用いてコイルの非線形電磁界解析を行う。

(2) 交流損失評価モデルの構築【H29】

平成 28 年度に構築した超伝導線経験磁界評価手法について、超伝導コイルをコイル断面内に一樣な電流が流れる導体としてモデル化している影響を評価したが、このモデル化による誤差はわずかであることを確認した。具体的には、実際の超伝導線で巻かれたコイルでは、電流はコイル断面内で離散的に存在しているが、Opera(TOSCA)による磁界計算では、超伝導コイルは一樣な電流が流れる導体(コイルブロック)としてモデル化され、コイル断面内の離散的な電流分布は無視されている。また、超伝導線内には不均一な電流分布が発生することが知られているが、この分布も無視されている。これらの単純化の影響を調べるため、コイルブロック全体を 4 mm(超伝導線の幅)だけ移動させた場合にコイルブロック中の経験磁界がどの程度変化するかを評価した。コイルブロック内の経験磁界が最大になる位置における経験磁界を、コイルブロックを移動させた場合と移動させない場合について比較した。両者の差はわずかであり、一樣電流分布を仮定したことによる誤差は無視できると考えられる。

鉄ヨークは非線形磁気特性を持つため、コイル通電電流に対してコイルブロック内各位置における磁束密度はコイル通電電流に比例しない。厳密に鉄ヨークの非線形磁気特性を考慮するには、異なる電流値に対してコイルブロック内の磁束密度分布を計算し、交流損失解析に反映する必要がある。鉄ヨークの非線形磁気特性を考慮するため、異なるコイル通電電流値における超伝導コイル経験磁界を計算し、折れ線関数によって超伝導コイル内の任意の点における磁束密度を定式化することとした。

また、電磁界解析による交流損失評価には、上記のモデルによって直接得られる超伝導コイルブロック内の経験磁界分布ではなく、離散的に分布している超伝導線位置の磁界データが必要であるため、これを補間によって得る磁界計算用ソフトウェアを開発した。経験磁界データを変換するにあたり、初めに、Opera(TOSCA)によって、超伝導コイルの各位置における十分な数のコイルブロック断面内の経験磁界データを計算する。次に、開発したソフトウェアによってコイルブロック断面内の超伝導線位置における経験磁界を 1 次補間によって計算する。最後に、隣接するコイルブロック間の対応する超伝導線同士を接続し、超伝導コイル内の超伝導線の 3 次元的な形状を再現することにより、離散的な超伝導線位置を考慮した超伝導線経験磁界分布データが完成する。

高温超伝導コイルの交流損失評価のための専用電磁界解析ソフトウェアを別途開発した。この電磁界解析ソフトウェアでは、別途開発された高温超伝導線の 3 次元電磁界解析技術を用い、鉄ヨークが発生する超伝導線の経験磁界分布及び超伝導線の非線形導電特性を入力とすることにより、鉄ヨークの非線形磁気特性と超伝導線の非線形導電特性を考慮した超伝導マグネットの交流損失評価を可能とした。また、H マトリクス法と呼ばれる手法の導入により、大規模な 3 次元電磁界解析を可能としている。超伝導線材の非線形導電特性として、磁界の強度・角度依存性を考慮した式を使用した。

3.1.3 低交流損失高温超伝導マグネットの設計

(1) マグネットの交流損失定量化【H30】

① 高温超伝導コイルと鉄ヨークの位置関係及び形状が超伝導線経験磁界に与える影響の検証

高温超伝導コイルと鉄ヨークの相対位置関係及びそれらの形状が、高温超伝導コイルの経験磁界にどのように影響を及ぼすかを、Opera(TOSCA)を使用した3次元静磁界解析によって評価した。機能分離型マグネットを使用する加速器システムと機能結合型マグネットを使用する加速器システムを検討対象とした。検討対象の加速器システムの諸元を表 3.1-1 に示す。

始めに、高温超伝導コイルと鉄ヨークの位置関係が高温超伝導線経験磁界に与える影響について検討した。交流損失を低減するには高温超伝導線に対して垂直な磁界成分を低減することが有効であるが、これを実現するには磁極からコイルを可能な限り離し、マグネット中央面に近づけることが有効であることが静磁界解析によって確認された。

次に、高温超伝導コイルを構成するコイルの数及び各コイルのターン数を増やしたマグネットにおける経験磁界分布を評価した。ただし、起磁力を揃えるため、高温超伝導コイル断面における電流密度を低下させている。この結果、電流密度が低下しかつコイル断面が大きくなっているため自己磁界が低下し、高温超伝導線経験磁界が低下することが確認された。このことから、コイル間・ターン間の距離を増加させる手法が、低交流損失マグネットの設計に有用であると予想される。

最後に、リターンヨークの太さの変更を行い、高温超伝導線経験磁界を評価したが、鉄ヨーク太さは経験磁界に大きな影響を与えないことが確認された。これは、リターンヨークの飽和よりも磁極の飽和が顕著であり、磁極からの漏れ磁束が鉄ヨークによって発生する磁界を支配していたことが原因であると考えられる。

② 設計の異なるマグネットにおける交流損失の比較

ここでは、機能分離型マグネットと機能結合型マグネットにおける交流損失を比較する。マグネットを構成する高温超伝導コイルの諸元を表 3.1-2 に示す。コイル長さは機能分離型マグネットと機能結合型マグネットで異なり、表 3.1-1 に示すマグネット長さから決まる。高温超伝導コイルを構成する高温超伝導線の、式 3.1-1 中の臨界電流密度 J_c の経験磁界強度 B 及び印加角度 φ に対する依存性を以下の式で定式化した。

$$J_c(B, \varphi) = \left(J_{cab}^m(B, \varphi) + J_{cc}^m(B, \varphi) \right)^{1/m} \quad (3.1-2)$$

$$J_{cab,c}(B, \varphi) = J_{c0ab,c} / \left(1 + B f_{ab,c}(\varphi) / B_{0ab,c} \right)^{\beta_{ab,c}} \quad (3.1-3)$$

ab, c は ab または c のいずれかを意味する。 $f_{ab,c}(\varphi)$ は以下の式で表される。

$$f_{ab}(\varphi) = \sqrt{u_{ab}^2 \cos^2(\varphi - \delta_{ab}) + \sin^2(\varphi - \delta_{ab})} \quad (3.1-4)$$

$$f_c(\varphi) = \begin{cases} \sqrt{\cos^2(\varphi - \delta_{ab}) + u_c^2 \sin^2(\varphi - \delta_{ab})} & (-90^\circ + \delta_c \leq \varphi \leq 90^\circ + \delta_c) \\ \sqrt{v^2 \cos^2(\varphi - \delta_{ab}) + u_c^2 \sin^2(\varphi - \delta_{ab})} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.1-5)$$

65 K における J_c の測定値と定式化結果を図 3.1-3(a) に示す。

図 3.1-4 及び図 3.1-5 に、機能分離型マグネットと機能結合型マグネットの電磁界解析結果として、交流損失密度分布、経験垂直磁界成分 B_n 、臨界電流密度 J_c の分布をそれぞれ示す。ここでは、最も交流損失密度が大きい、マグネット中央面に近いコイルのみをプロットしている。機能分離型、機能結合型のいずれのマグネットにおいても、鉄ヨークと高温超伝導コイルを組み合わせた際には、鉄ヨークに覆われていないコイルエンドの箇所では交流損失が高くなっていることが確認された。これは、コイルエンドの箇所では臨界電流密度が高く、かつ垂直磁界成分が強くなっていることが原因である。機能分離型マグネットと機能結合型マグネットを比較すると、マグネット当たりの交流損失は機能結合型マグネットの方が低くなるが、その値に大きな差はない。これは、交流損失密度が高い領域がコイルエンド部に顕著に集中していることに起因している。機能分離型マグネットと機能結合型マグネットでは鉄ヨークに覆われている箇所の長さが異なっているが、この位置での損失密度は低く、鉄ヨークに覆われている箇所の長さはマグネット当たりの損失にはあまり影響を与えない。この結果、1 台のマグネットによる偏向角が小さく、シンクロトロン当たりのマグネット台数が多い機能結合型マグネットの方が、シンクロトロン当たりの発生損失が高くなる。ただし、機能分離型マグネットを使った加速器においては 4 極マグネットや 6 極マグネットが別途必要となることに注意が必要である。これらのマグネットは、現時点では銅コイルからなるマグネットを使用する想定であり、無視できない大きさの電力を消費することが予想される。より長いマグネットを使用して主マグネットの台数を減らした機能結合型マグネットを使った加速器を構成すれば、高温超伝導マグネットにおける損失を低減しつつ、4 極マグネットや 6 極マグネットの台数を削減することで銅コイルからなるマグネットの消費電力を抑制することが可能となる。これにより、シンクロトロン当たりのマグネット消費電力は低減されるものと予想される。

③ 高温超伝導コイルの運転温度が交流損失特性に与える影響の検証

高温超伝導マグネットの運転温度が変化すると、高温超伝導線の臨界電流が変化し交流損失特性が変化する。この影響についての初期検討を行った。70 K における高温超伝導線の J_c の磁界依存性を図 3.1-3(b)に示す。ここでの検討では、交流損失には大きな影響は見られなかった。これは、高温超伝導マグネットの負荷率(臨界電流に対する最大通電電流の割合)が低いことによるものと考えられ、より現実的な負荷率(50%程度)におけるさらなる検討が必要である。

④ 大電流容量導体の模擬構造における交流損失の基礎検討

高温超伝導線単線でマグネットを構成するとコイルインダクタンスが増大するため、インダクタンス抑制のために高温超伝導線を集合化した大電流容量導体の適用が必要になると考えられる。大電流容量導体でマグネットを構成した場合の交流損失特性についての比較を通して基礎検討を行った。具体的には、Conductor on Round Core ケーブル(CORC ケーブル)[1]について、マグネットの一部の電磁環境を模擬した条件での交流損失特性について基礎的な検討を行った。

詳細な検討結果については 3.1.3(2)③及び④で述べる。

(2) 交流損失を低減したマグネット設計確立【R1】

① 高温超伝導マグネットの超伝導コイル・鉄ヨーク形状の最適化

I. 検討対象とするマグネット

高温超伝導マグネットの消費電力は、超伝導コイルで発生する交流損失を取り除くための冷凍機の消費電力と、鉄ヨークにおける鉄損から決まる。超伝導コイルの交流損失低減策として平成 30 年度の静磁界解析から示された、超伝導コイル断面を広げ経験磁界を下げる方法を採用した。また、鉄損を減らすため、図 3.1-6(b)に示すように鉄ヨークと超伝導コイル間隔を狭くすることによって鉄ヨーク体積を低減する方法を採用した。鉄ヨーク内での磁束密度が等しいと仮定するならば図 3.1-6(a), (b)に示す設計では鉄ヨークでの鉄損密度は等しくなる。そのため、マグネット当たりの鉄損は鉄ヨーク体積にのみ依存することになるため、図 3.1-6(b)に示す超伝導コイルと鉄ヨーク間隔が狭い設計の方が鉄損は小さくなると予想される。

表 3.1-3 に示す 6 種類の異なる設計のマグネットを対象として消費電力を評価した。図 3.1-7(a)に示すようなスタックケーブルで構成された変形パンケーキコイルを図 3.1-7(b)に示すように積層することによって構成される。隣接する高温超伝導線同士の間隔は約 0.1 mm、積層された変形パンケーキコイル同士の間隔は 1 mm から 11 mm まで変更した。マグネット 1 からマグネット 3 の鉄ヨーク形状は同一であるが、超伝導コイルと鉄ヨーク間隔は異なる。マグネット 4 からマグネット 6 はそれぞれマグネット 1 からマグネット 3 と同じコイル断面形状をもつが、鉄ヨーク形状はそれぞれのコイル形状に対して鉄ヨークとコイル間隔が 50 mm となるように変更している。この間隔は、超伝導コイル周辺にある真空容器等の冷却構造を考慮した最小のものである。鉄ヨークの太さはいずれのマグネットに対しても 300 mm で固定した。結果として、マグネット 4 の鉄ヨーク体積が最も小さく、マグネット 6 の鉄ヨーク体積が最も大きい。また、全マグネットは同一の磁極形状をもち、鉄ヨーク形状やコイル形状が発生磁界に対して与える影響は十分小さいとみなすことができる。加えて、公平な比較のために、全てのマグネットの負荷率(通電電流をマグネット中の局所的な臨界電流で除したものを)を約 50%となるように設計した。

マグネット 1 からマグネット 6 を対象として、平成 29 年度に構築された交流損失評価モデルを用いて交流損失計算を行った。超伝導線材の導電特性としては図 3.1-3(a)に示す 65 K における臨界電流密度 J_c の磁界依存性を用いた。マグネットを構成する高温超伝導線は、幅 4 mm、厚さ 0.1 mm、超伝導層厚さ 1.75 μm を想定した。

II. 設計されたマグネットの鉄損評価方法の検討

マグネットの消費電力を議論するためには、超伝導コイルにおける交流損失だけではなく鉄ヨークにおける鉄損の評価が必要である。鉄ヨークにおける鉄損は、通電電流ピーク値が最大となる時刻における鉄ヨーク内の磁束密度から計算する。RCS 用マグネットは 0 A から最大電流値までの運転であり、一般的な変圧器などの電力機器における鉄損の議論とは異なり、図 3.1-8 に示すように磁化のヒステリシスループは小さいとみなすことができる。すなわち、RCS 用マグネットの鉄ヨークにおいて、ヒステリシスループの面積によって決まるヒステリシス損失は小さいことが予想され、RCS 用マグネットの鉄ヨークにおける鉄損は渦電流損失によって支配されているとみなすことができる。また、加速器用マグネットの鉄ヨークは、一般に非常に薄い鉄シート(鋼板)を積層して構成されることから、磁束は 1 枚の鉄シート内に閉じ込められるとみなすことができる。すなわち、鉄シートをまたいで流れるような渦電流は誘導されず、渦電流損失を計算するためには 1 枚の鉄シートで閉じた渦電流による損失のみを考慮すればよい。図 3.1-9 に示すように、鉄シートを 5 つの異なる領域に分割し、それぞれの領域の中心における渦電流損失密度を、その位置にお

ける磁束密度から以下の式によって計算する。

$$p_v = \frac{\pi^2}{6\rho} \left(\frac{B_m}{2} \right)^2 f^2 t_i^2 \quad (3.1-6)$$

ここで、 ρ は鉄シートの抵抗率であり $5 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ とした。また、 B_m は図 3.1-9 の各領域内の赤点の位置における磁束密度のうち、矢印で示されている方向の成分である。 f は電流(または磁界)の周波数、 t_i は鉄シートの厚さである。ここでは、 f は 100 Hz、 t_i は 0.5 mm として計算した。また、マグネット長手方向では鉄シート内の磁束分布が異なる可能性があるため、マグネット中心とマグネット端における鉄シート内鉄損密度をそれぞれ計算し、4:1 の加重平均を求め、マグネットの平均鉄損密度とした。この値に各鉄ヨークの体積を乗じることによって、各マグネットの鉄損を得る。

III. 設計されたマグネットの消費電力評価

マグネット 1 からマグネット 3 における、高温超伝導線単位長さ当たりの交流損失密度のコイル内分布と、高温超伝導線に対して垂直な磁界成分のコイル内分布を図 3.1-10 に示す。コイル断面積はマグネット 3 が最も大きく、マグネット 1 が最も小さい。そのため、マグネット 3 のコイル断面での電流密度は低く、コイル電流による磁束密度も低い。結果として、マグネット 3 における交流損失密度は最も低い。一方、マグネット 4 からマグネット 6 における高温超伝導線単位長さ当たりの交流損失密度のコイル内分布、高温超伝導線に対して垂直な磁界成分のコイル内分布を図 3.1-11 に示す。図 3.1-10 と図 3.1-11 を比較すると、コイルと鉄ヨーク間隔が狭いマグネット(マグネット 4 からマグネット 6)の方が、磁束密度の垂直成分並びに交流損失密度が高いことがわかる。鉄ヨークと超伝導線が近くなったことによってより鉄ヨークからの漏れ磁束がより強く影響するようになったために高温超伝導コイルを構成する超伝導線の経験磁界が上昇し、結果として交流損失密度が上昇したと考えられる。

マグネット 1 からマグネット 6 の、それぞれのマグネットを構成する超伝導コイルにおける交流損失の時間変化を図 3.1-12 に示す。マグネット 1 からマグネット 3 の比較、及びマグネット 4 からマグネット 6 の比較から、コイル断面が大きい場合には交流損失が低下することがわかる。また、マグネット 1 とマグネット 4、マグネット 2 とマグネット 5、マグネット 3 とマグネット 6 をそれぞれ比較すると、コイルと鉄ヨーク間隔が狭いマグネットは、交流損失が増加することがわかる。

それぞれのマグネットにおける鉄損を計算した結果として、コイル形状が異なるマグネット 1 からマグネット 3 では、鉄損密度の分布及びマグネット全体での鉄損はほぼ変化しないことが確認された。また、高温超伝導コイルと鉄ヨークの間隔を狭めることにより、マグネット各部の鉄損密度は低下すること、またマグネット全体での鉄損は低下することが明らかになった。マグネット全体での鉄損の低下は、漏れ磁束の増加に伴う鉄シート内部の鉄損密度の低下及び鉄ヨークの体積の減少によるものである。

マグネット 1 からマグネット 6 における交流損失、冷凍機消費電力、鉄損、そして合計の消費電力を表 3.1-4 に整理する。ここで、冷凍機の効率は 65 K において 0.05 と仮定した[2]。マグネットの消費電力をみると、コイル断面の拡大はマグネットの消費電力低減に有効であることが確認された。一方、超伝導コイルと鉄ヨーク間隔を狭くすることは、交流損失の増大と鉄損の低減という相反する効果をもつため複雑である。今回設計した結果によれば、消費電力の観点から見ると最も優れたマグネットはマグネット 6 であることが確認された。

ここまでの議論を踏まえ、設計された RCS のマグネット消費電力を表 3.1-5 にまとめる。RCS を構成するマグネットは、機能結合型マグネット、チューン補正用 4 極マグネット、色収差補正用及び取出し用 6 極マグネットである。4 極マグネットと 6 極マグネットについては銅コイルと鉄ヨークを組み合わせたマグネットとして検討されている。また、表 3.1-5 には銅コイルを用いた機能結合型マグネット、高温超伝導コイルを使用し鉄ヨークは銅コイルを用いた場合と同じ形状とした機能結合型マグネット(マグネット 1 に相当)、そして高温超伝導コイル断面を広げた上で鉄ヨークを小さくした機能結合型マグネット(マグネット 6 に相当)を示している。この結果からわかる通り、最終的な設計である大コイル断面+小鉄ヨークの設計では、機能結合型マグネットのコイルにおける損失は銅コイルを用いたマグネットと比較して約 10 分の 1 となった。なお、コイルの損失は、冷却に必要な冷凍機の効率が考慮されており、コイルにおける発熱を除熱するための消費電力となっている。加えて、鉄ヨークの体積を削減することによって機能結合型マグネットの鉄の損失も低減することに成功している。4 極マグネット及び 6 極マグネットにおける消費電力は機能結合型マグネットの設計に関わらず一定である。結果として、高温超伝導コイルを用い、マグネット設計を工夫することにより、銅コイルを用いた機能結合型マグネットを使用した場合と比較して、RCS を構成するマグネット全体の消費電力を約 3 分の 1 に低減することが可能であることが示された。

② 異なる運転温度におけるマグネットの消費電力

I. 異なる温度条件の影響

前項における 6 つの解析モデルにおいて、マグネットの温度はすべて 65 K と仮定している。このマグネットの温度条件を変えた場合、超伝導体の導電特性が変化し、これに支配されているマグネットの交流損失も変化すると予想される。また、冷凍機の冷凍効率は温度差によって決まるため、マグネットの温度が変わると冷凍機の冷凍効率も変化する。一方、鉄ヨークは室温環境に配置しているため、マグネットの運転温度は鉄損に影響しない。

運転温度を 65 K から 70 K に上昇させた場合、超伝導体の導電特性は図 3.1-3 に示すように臨界電流密度 J_c が低下し、温度上昇により線材に流せる最大電流値である臨界電流値が半減する。負荷率 50% のマグネット設計する場合、70 K では 1 ターンに流せる電流値がおおよそ半減するため、同様の磁場を発生させるためにはターン数を約 2 倍に増やす必要がある。

温度条件が冷凍機の効率に与える影響について考察する。冷凍機の理論上の最大効率は下記の式によって決まる。

$$\eta = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (3.1-7)$$

T_h は高い側の温度であり、ここでは室温である 300 K と仮定した。 T_c は低い側の温度である。温度差が小さいほど冷凍効率は上昇する傾向にあり、マグネットの温度条件が 65 K から 70 K に変化した場合、冷凍機の効率は約 1 割向上すると考えられる。

総合的に考えると、マグネットの運転温度を高くした場合、マグネットの交流損失の増加と冷凍機効率の向上の 2 つの相反する効果を持つ要素がマグネットの高温超伝導コイルを冷却するために必要な電力に寄与すると考えられる。

また、減圧をせず液体窒素の大気圧の沸点である 77 K の温度条件での運転も検討したが、この場合線材の臨界電流値は 65 K の時の臨界電流値の約 1/4 になる。流せる電流値の減少を

補うためにはコイルのターン数を約 4 倍に増やす必要がある。ターン数が増えるデメリットは多く、

- ・ マグネットのコイル断面を大きくする必要があり、マグネットの鉄ヨークの体積が増え、鉄損が増加する
- ・ 線材コストの増加に伴うマグネット製作コストが増加する
- ・ 線材単位長さの交流損失が 65 K の時と同様と仮定した場合、交流損失も線材の全長と比例して 4 倍に増加する

などの問題が挙げられる。メリットとして、高い温度条件では冷凍機の効率は向上するが、これを加味しても 77 K の温度条件での設計は現実的ではないと考え、ここでは 77 K の温度条件でのマグネット設計は行っていない。

II. 異なる運転温度でのマグネット設計

温度条件の与える影響を具体的に分析するために、前項で消費電力が最も低かったマグネット 6 の設計に基づいて運転温度を 70 K に設定したマグネット 7 とマグネット 8 を設計した。公平な比較を行うために、マグネットの負荷率を 50% にした。また、実際の高温超伝導コイルの形状の制約条件として、高温超伝導線同士の間隔は約 0.1 mm になるように設計する必要がある。負荷率を 50% にすると、70 K では臨界電流が低下するため高温超伝導線一本当たりの通電電流が低下する。起磁力を確保するために、コイルのターン数を増やす必要がある。超伝導線同士の間隔を固定する場合、コイル断面を変えずにコイル間隔を狭めてコイル数を増やす、またはコイル断面を大きくして 1 コイル当たりのターン数を増やす必要がある。温度条件を 70 K としたマグネット 7 とマグネット 8 の詳細を表 3.1-6 に示した。

マグネット 7 は、温度条件が 65 K のマグネット 6 の設計からコイル数を増やした設計となっている。コイル断面積はマグネット 6 と変わらないが、コイル数をマグネット 6 の 4 つから 6 つに増やしている。これによって、隣接する変形パンケーキコイル間隔は 11 mm から 6 mm に減少した。コイル断面積は同じため、鉄ヨークの形状も同じになり、鉄損はマグネット 6 とほぼ同じになると予想される。

マグネット 8 は、温度条件が 65 K のマグネット 6 の設計から 1 コイル当たりのターン数を増やした設計となっている。コイル数はマグネット 6 と変わらないが、図 3.1-5 に示したコイル断面の横方向長さ R_c を 40 mm から 60 mm に伸ばした。鉄ヨークとコイルは最低 5 mm の冷却構造を確保するための距離を残す必要があるため、コイル断面の増大に伴い鉄ヨークが大きくなっている。これにより、鉄ヨークの総体積が増え、鉄損が増加する。これに相反して、マグネット 7 に比べて超伝導コイル断面を広げたことによる交流損失の低減が予想される。

III. 異なる温度条件のマグネットの消費電力評価

異なる温度条件 (70 K) で運転するマグネット 7 とマグネット 8 における鉄損の計算方法は前項で述べた 65 K で運転するマグネット 6 の鉄損の評価方法と同じである。

温度条件が 65 K であるマグネット 6 と、温度条件が 70 K であるマグネット 7 とマグネット 8 における高温超伝導線単位長さ当たりの交流損失密度のコイル内分布と、高温超伝導線に対して垂直な磁界成分のコイル内分布を図 3.1-13 に示す。コイル断面積はマグネット 8 が最も大きく、マグネット 6 とマグネット 7 が等しく小さい。そのため、マグネット 8 のコイル断面での電流密度は

低く、コイル電流による磁束密度も低い。結果として、垂直な磁界成分はマグネット 6 とマグネット 7 が同程度で、マグネット 8 が比較的低い。交流損失は垂直な磁界成分に支配されるため、マグネット 6 とマグネット 7 は近い交流損失密度になると予想していたが、実際はマグネット 6 に比べてマグネット 7 の交流損失密度は大きく上昇している。この現象の原因として考えられるのは、温度上昇による高温超伝導体における導電率の低下が挙げられる。同じ温度条件にあるマグネット 7 とマグネット 8 においては、垂直な磁界成分が小さいマグネット 8 の交流損失密度が比較的小さい。

温度条件が 65 K であるマグネット 6 と温度条件が 70 K であるマグネット 7 とマグネット 8 の超伝導コイルにおける交流損失の時間変化を図 3.1-14 に示す。マグネット 6 とマグネット 7 の比較から、運転温度の上昇に伴い交流損失が大きく増加することがわかる。また、マグネット 7 とマグネット 8 の比較から、高い温度条件においても、コイル断面を大きくすることによる交流損失の低減効果が確認された。

マグネット 6 からマグネット 8 における交流損失、冷凍機消費電力、鉄損、そして合計の消費電力を表 3.1-7 に整理する。70 K による冷凍機の効率、65 K での式 3.1-7 を参考にし、65 K において 0.05、70 K において 0.055 と仮定した。しかし、温度上昇によるコイル内の交流損失の著しい増加に対して冷凍機効率の向上による消費電力の低減効果は効かず、マグネットの運転温度の上昇は冷凍機の消費電力を増やす傾向にある。一方、鉄ヨークは室温環境にあるため、高温超伝導コイルの温度条件には関係なく、マグネット 6 とマグネット 7 は同じ鉄ヨーク形状を持つため、鉄損は同じになる。マグネット 8 はコイル断面を大きくした関係上、鉄ヨークも少し大きく調整され、鉄損が少し増えた。しかし、コイル断面を大きくしたことによる交流損失低減効果の方が支配的であり、鉄損の増加を加味しても、コイル断面が大きいマグネット 8 の方が電力消費は同じ温度条件にあるマグネット 7 に比べて小さい。

マグネットの消費電力の観点から、今回の解析結果からはマグネットの運転温度は低い方が良いことが確認された。運転温度を高くした場合、冷凍機の効率は良くなるが、超伝導コイルにおける交流損失の増加の方が支配的であった。また、減圧された液体窒素による浸漬冷却によって 65 K よりも低い温度(例えば 60 K)で高温超伝導コイルを運転することは実績がなく、実現性の点で問題がある。そのため、マグネット運転温度の検討においては、現実的かつ低消費電力マグネットが実現可能である 65 K での設計・運転が好ましいという結論に至った。

③ CORC ケーブルで構成されるマグネットの交流損失評価

I. CORC ケーブルで構成されるマグネットの電磁界解析方法

CORC ケーブルは、複数本の高温超伝導線を円柱状の芯材の周囲に螺旋状に巻いたような複雑な 3 次元構造をもっている。このような複雑な形状をもつケーブルで巻かれたコイルの電磁界解析においては、多数のケーブルを含んだマグネット全体を解析対象とすることは非常に困難である。CORC ケーブルの長手方向の複雑な電磁界分布を考慮しつつマグネット全体の損失についての議論をするためには、いくつかの近似や計算の簡略化が必要となる。

一つ目の簡略化として、コイル断面における電流分布を単純化した。CORC ケーブルで構成したコイル断面には CORC ケーブルの 3 次元形状に起因する複雑な電流分布が存在する。コイルを構成する高温超伝導線経験磁界計算の過程では、スタックケーブルで構成されるマグネット

の電磁界解析において行ったのと同様にコイルをコイルブロックとして扱い、コイルブロック内における電流分布は一樣であると仮定する。

二つ目の簡略化は、同じく高温超伝導線経験磁界計算における近似である。コイル断面には図 3.1-15 のように CORC ケーブルが並んでいる。この CORC ケーブル一本が存在する領域を一つの要素としてコイル断面に格子を形成し、各格子の格子点における磁界の値を計算する。そして CORC ケーブル一本に対応する格子の格子点四つの磁界の値と、それらの格子点と CORC ケーブル上の計算点との距離を用いて CORC ケーブルを構成する高温超伝導線における経験磁界を計算する。実際には CORC ケーブルに流れる電流によって発生する自己磁界の影響で格子内にも電流分布が存在するが、CORC ケーブル一本分の自己磁界とそのケーブルが受ける経験磁界を比較すると経験磁界が支配的であるため、ここでは解析対象ケーブルの電流に起因して発生する自己磁界による格子内の磁界分布は考慮しない。加えて、図 3.1-16 に示すように長手方向における経験磁界の分布は一樣であると仮定して経験磁界の計算を行う。厳密には長手方向にも分布は存在しているが、CORC ケーブルの一周期分の長さに対してコイルの長手方向の長さは十分に大きいため、CORC ケーブルの一周期分の計算をするのであれば長手方向の分布は考慮する必要はないと判断した。

三つ目の簡略化は、コイル自体の 3 次元形状に関する近似である。CORC ケーブルのみでなくコイル自体にも 3 次元形状が存在するため、断面の位置によってはその断面を起点として存在する CORC ケーブルの一周期は直線とまらない場合がある。この場合においても解析対象の CORC ケーブルの一周期は直線状であると仮定して解析を行うこととする。CORC ケーブルの一周期の長さはコイルの長手方向の長さに比べて非常に短いため、このように直線状であるという近似を行っても結果に大きな差異は生じないと判断した。

四つ目の簡略化は、一つのコイル断面内に存在する複数本の CORC ケーブルの近似である。一つのコイル断面には通常数百から数千の CORC ケーブルが存在しているため、その全ての CORC ケーブルについて電磁界解析を行うと膨大な時間を要する。そこで図 3.1-17 に示すようにコイル断面をいくつかの要素に分割し、それらの中央に存在する CORC ケーブル一本を解析対象として電磁界解析を行い、その電磁界解析結果が要素内の全ての CORC ケーブルにおいて共通のものとして扱い、断面全体において発生する交流損失を推測する方法をとった。今回のモデルに関しては断面内に縦 20 本、横 20 本、計 400 本の CORC ケーブルが存在し、断面を 16 分割してそれらの中央にある計 16 本の CORC ケーブルをコイル断面一つにおける解析対象とした。

五つ目の簡略化は、解析する断面の選択方法である。CORC ケーブルで巻いたコイルを解析する場合、単線コイルの解析の結果から特徴点を設定し、それらの特徴点の電磁界解析の結果からコイル全体の損失を計算する。単線コイルの際にも行った手法であるが、単線コイルの解析結果から大まかな損失分布の傾向は把握できているため、その傾向からいくつかの解析点を選択することでさらに解析時間の短縮を図った。

以上の四点において、解析する上で無視される要素をまとめると以下のようになる。

- コイル内に存在する正確な電流分布
- コイル長手方向に存在する磁界分布
- コイルの厳密な 3 次元形状

- ・ 解析対象の CORC ケーブル以外のケーブルに存在する非一様な電流分布

II. CORC ケーブルで構成されるマグネットの解析諸元

CORC ケーブルでコイルを巻く場合、CORC ケーブルの中心に芯材が存在する影響でケーブルでの電流密度がスタックケーブルよりも低くなる。このため、CORC ケーブルで巻かれたコイルのコイル断面は Roebel ケーブルで巻かれたコイルよりも大きくなる。

また、ここでは交流損失の比較のため、マグネットの鉄ヨーク形状は表 3.1-3 に示すマグネット 1 の鉄ヨーク形状と同一とした。鉄ヨークを構成する鉄の磁化特性、CORC ケーブルを構成する高温超伝導線の導電特性は 3.1.3(2)①で対象としたものと同じとし、65 K での運転を想定した。

解析対象とした CORC ケーブルの諸元を表 3.1-8 に示す。この CORC ケーブルにおいて各超伝導線に流れる電流は同じであると仮定して計算を行う。

III. CORC ケーブルで構成されるマグネットの交流損失解析結果

図 3.1-18 に CORC ケーブルの 3 次元損失分布を示す。これは、電流値の変化量が大きい時刻における交流損失密度分布である。また、図 3.1-19 に図 3.1-18 の 3 次元損失密度分布を展開し、平面にした各層の高温超伝導線にプロットしている。これより、各層において 180 度刻みで交流損失が集中している部分が存在していることがわかる。これが CORC ケーブルにおける交流損失の 3 次元分布の一番の特徴であり、線材が螺旋状に巻かれているため常に磁界が垂直にかかる箇所が二箇所存在し、この周辺では交流損失が大きくなる。また損失が集中している部分の中心、超伝導線の中心部分において損失は小さくなっている。また同 CORC ケーブルにおける超伝導線一本当たりが発生する交流損失の時間変化を図 3.1-20 に示す。このグラフを確認すると交流損失のピークは電流値の傾きが一番大きくなる時点、すなわち di/dt が一番大きい時点であるということがわかる。このことから CORC ケーブルの交流損失は外部磁界による損失が主な要因となっていることがわかる。また、CORC ケーブルで巻かれたコイルにおける交流損失は 64.8 kW となり、表 3.1-4 に示しているスタックケーブルで構成されるマグネット 1 の損失の 100 倍を超える損失が発生するという結果が得られた。

この大きな交流損失の差が発生した理由は、CORC ケーブルで巻かれたコイルでは高温超伝導線が線幅広面を同じ方向に向けておらず、かつ超伝導線間隔が広いことによるものと考えられる。ケーブルの構造に由来して超伝導線同士の相互作用が弱くなっており、外部から超伝導線に印加される磁界を遮蔽する効果が小さい。結果として、外部から超伝導線に印加される磁界が大きくなり、交流損失が増大したものと予想される。

④ 異なる高温超伝導集合導体で構成されるマグネットの比較

ここでは、高温超伝導線単線、転位構造をもつスタックケーブル(図 3.1-21(a))、Roebel ケーブル(図 3.1-21(b))、CORC ケーブル(図 3.1-21(c))を比較し、ADS 用 RCS に用いるマグネットを構成する集合導体としていずれが適切であるかを検討する。

最初に、高温超伝導線単線で、RCS 用マグネットのようなメートル級のコイルを巻線することは、テープ形状をもつ高温超伝導線の機械的強度の観点から非常に困難である。さらに、単線で構成することによりマグネットのターン数が増え、インダクタンスが増大するという問題もある。インダ

クタンスの大きいマグネットの運転には高電圧電源が必要となり、取扱が難しくなる。そのため、高温超伝導集合導体が必要である。

次に、高温超伝導線単線を厚さ方向に積み重ねた上で転位を施したスタックケーブル(図 3.1-21(a))について考える。平成 28 年度から平成 30 年度までの検討は、いずれもスタックケーブルで構成されるマグネットを前提としていた。スタックケーブルはその単純な断面形状からケーブル断面での電流密度が高い。スタックケーブルで構成されるマグネットの交流損失は、高温超伝導線単線で構成されるマグネットの交流損失とほぼ同じになると考えられる。しかし、スタックケーブルにおいてはケーブルを構成するそれぞれの高温超伝導線がそれぞれの幾何学的配置の差によってそれぞれの線の自己インダクタンスが異なる。そのため、各高温超伝導線に流れる電流が異なる、偏流と呼ばれる現象が発生する。結果としてケーブル電流密度をあまり高くできない。これを回避するためには図 3.1-21(a)に示すような、高温超伝導線の位置を入れ替え、それぞれの高温超伝導線のインダクタンスを揃える転位と呼ばれる構造をもたせることによって各高温超伝導線を均流化する必要があるが、スタックケーブルにおいてこの転位を施すことは容易ではなく、現実的な手法は提案されていない。そのため、スタックケーブルを用いて RCS 用高温超伝導マグネットを構成することは、現段階では現実的ではないと言える。

次に、Roebel ケーブルは、ジグザグ形状の高温超伝導線をより合わせることによって高温超伝導線の幾何学的位置が周期的に入れ替わるような構造となっており、転位がなされていることが特徴のケーブルである。Roebel ケーブルは高温超伝導線のマグネット応用のための集合導体として世界的に注目されている。Roebel ケーブルの模式図を図 3.1-21(b)に示す。Roebel ケーブルは 3 次元的なケーブル構造をもつが、そのケーブル断面はスタックケーブルを 2 本平行に並べたような形状となっており、Roebel ケーブルで構成されたマグネットの交流損失特性はスタックケーブルとほぼ同一であることが、実験的・理論的検討により明らかになっている[3]。そのため、高温超伝導線単線、スタックケーブルにおいて問題となる機械的強度、均流化の問題を解決しつつ、比較的高い電流密度及び比較的低い交流損失を実現できる高温超伝導集合導体として魅力的な選択肢である。

CORC ケーブルは、図 3.1-21(c)に示すような構造をもっており、銅などの円筒状芯材の周りに高温超伝導線を螺旋状に複数本巻き付けた形状をもつ。ケーブル断面がスタックケーブル・Roebel ケーブルとは異なり円形であることから機械的強度・自由度が高く、マグネットを構成するコイルを巻線しやすいとして注目されている。一方、ケーブル内に非超伝導体である芯材が必要である点でケーブル電流密度は Roebel ケーブルなどと比べて低い。また、Roebel ケーブルで可能であった転位が難しく、CORC ケーブルを構成する高温超伝導線間に流れる電流を揃えることが難しい。さらに、本研究によって明らかになった問題として前項で述べた通り、RCS 用マグネットを CORC ケーブルで構成した場合、ケーブルの構造由来の理由により交流損失が Roebel ケーブルなどと比べて非常に大きくなることが予想される。そのため、CORC ケーブルで構成される RCS 用マグネットは、ADS の低消費電力化のためには好ましくない。

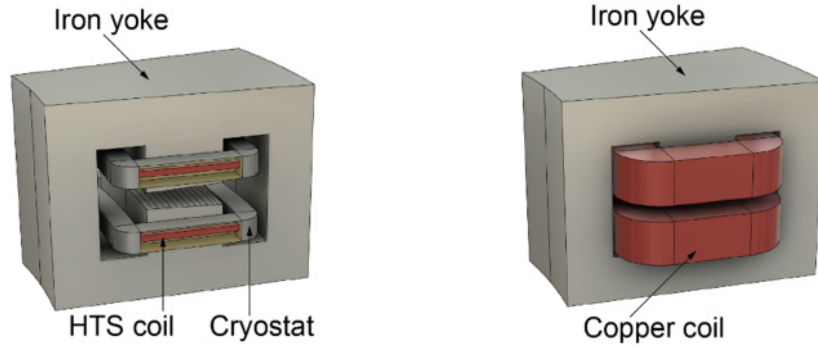
上述の議論の結果として、ADS 用 RCS に使う高温超伝導マグネットを構成する集合導体としては、Roebel ケーブルが最も有力な候補であると結論できる。

3.1.4 まとめ

高繰り返しシンクロトロンにはビームを偏向させるマグネットが必要であるが、従来用いられる銅コイルを用いたマグネットでは、銅コイルにおけるジュール損失及び鉄ヨークにおける鉄損が非常に大きいため消費電力が大きいという課題が存在する。本研究では、高繰り返しシンクロトロンの主マグネットに交流高温超伝導マグネットを用いることで上記課題の解決を図った。表 3.1-9 に示す概念設計した加速器システム(最終的な設計)の諸元からマグネットに要求される仕様を満たしながら低消費電力化を実現するために、高温超伝導コイルのコイル断面を広げるとともに高温超伝導コイルと鉄ヨークの間隔を可能な限り小さくすることによって、高温超伝導コイルにおける交流損失及び鉄ヨークにおける鉄損を低減した。具体的には、銅コイルを用いたマグネットと比較し、コイルにおける消費電力を 740 kW から 79 kW に、鉄ヨークにおける損失を 350 kW から 250 kW に低減した高温超伝導マグネットの概念設計に成功した。これにより、主マグネット、補正用 4 極マグネット及び補正用 6 極マグネットを合わせた高繰り返しシンクロトロン 1 基のマグネット消費電力を、従来の銅コイルを用いたマグネットを主マグネットとして使用した場合の 1.3 MW から 0.5 MW に低減できた。表 3.1-10、図 3.1-22 に最終的に概念設計した高温超伝導マグネットを示す。

参考文献:

- [1] D. C. van der Laan, P. D. Noyes, G. E. Miller, H. W. Weijers, and G. P. Willering, “Characterization of a high-temperature superconducting conductor on round core cables in magnetic fields up to 20 T,” *Superconductor Science and Technology*, Vol. 26, Art. No. 045005, 2013
- [2] C. Rey, *Superconductors in the Power Grid: Materials and Applications*, Cambridge, U.K.:Elsevier, pp. 384-387, 2015.
- [3] N. Amemiya, T. Tsukamoto, M. Nii, T. Komeda, T. Nakamura, and Z. Jiang, “Alternating current loss characteristics of a Roebel cable consisting of coated conductors and a three-dimensional structure,” *Superconductor Science and Technology*, Vol. 27, Art. No. 035007, 2014



(a) スーパーフェリックマグネット (b) 一般的な銅コイルを使ったマグネット

図 3.1-1 マグネットの模式図

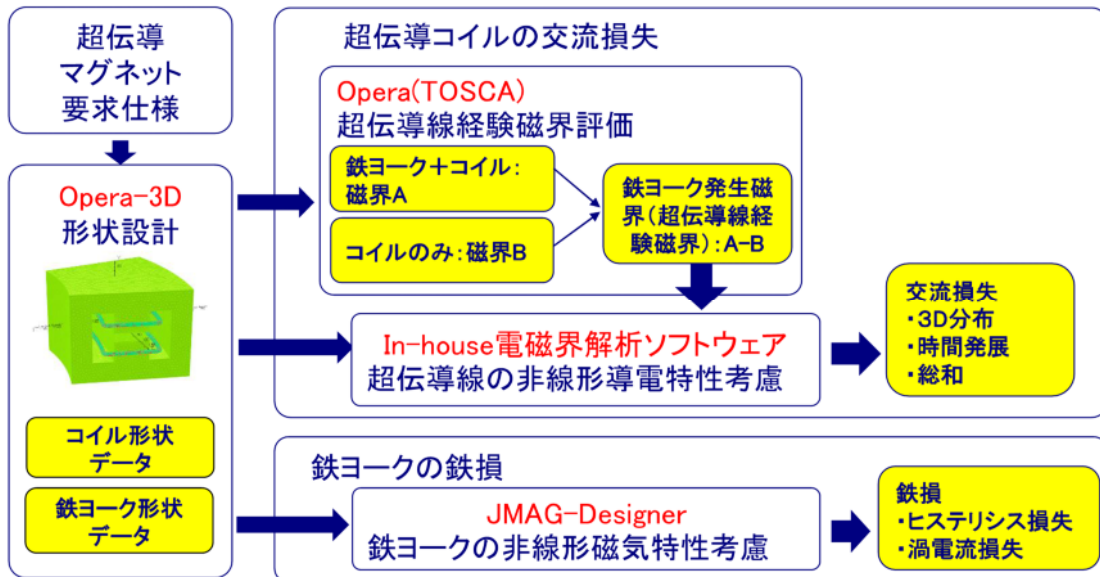


図 3.1-2 超伝導マグネットの交流損失評価方法

表 3.1-1 設計された加速器システムの諸元

使用する主マグネット	機能分離型マグネット	機能結合型マグネット
ビーム領域での最大磁界	1.47 T	1.40 T
偏向半径	5.09 m	5.00 m
周長	107.2 m	68.9 m
主マグネットの台数	16	32
偏向角	22.5°	11.25°
主マグネットの周方向長さ	2.000 m	1.053 m

表 3.1-2 機能分離型マグネット及び機能結合型マグネットを構成する高温超伝導コイルの諸元

コイル形状	変形レーストラックコイル
構成コイル数	8
コイル間隔	1 mm
コイル当たりのターン数	214
超伝導線幅	4 mm
超伝導線厚さ	0.1 mm
超伝導層厚さ	1.75 μm
ターン間隔	0.1 mm
通電電流最大値	43.5 A/turn
周波数	100 Hz
コイル長さ	表 3.1-1 による

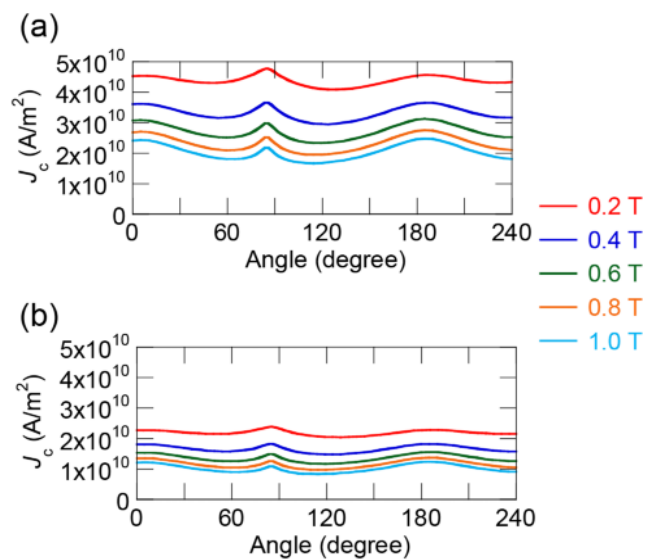


図 3.1-3 高温超伝導線の臨界電流密度 J_c の磁界依存性 (a) 65 K (b) 70 K

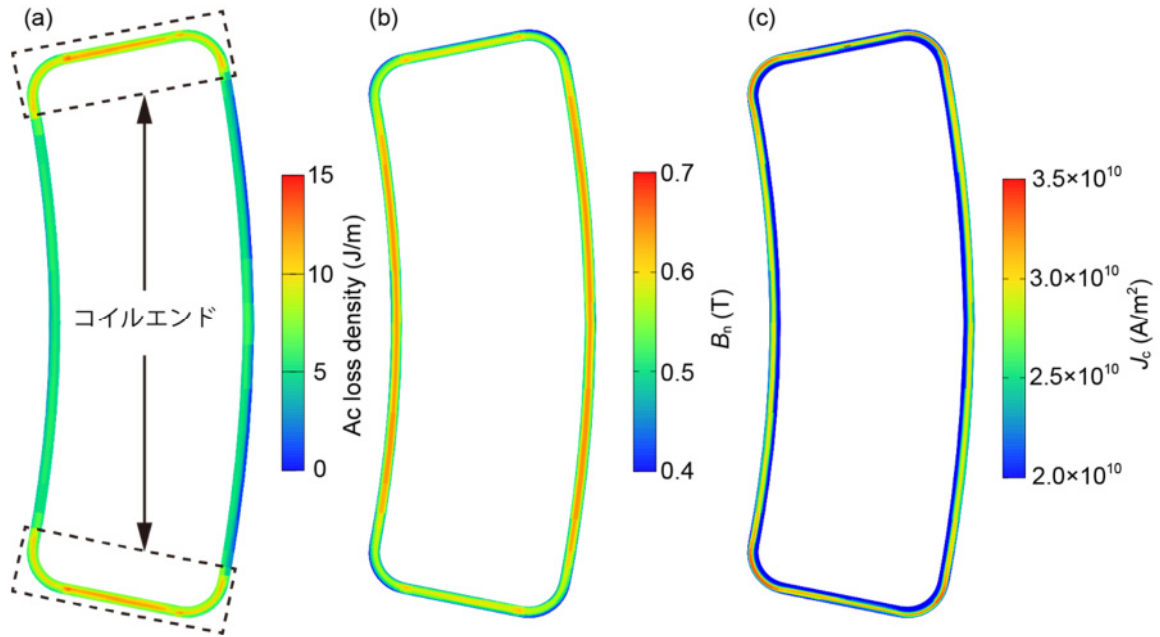


図 3.1-4 機能分離型マグネットを構成する高温超伝導コイルの電磁界解析結果 (a) 交流損失密度分布 (b) 経線垂直磁界成分 B_n 分布 (c) 臨界電流密度 J_c 分布

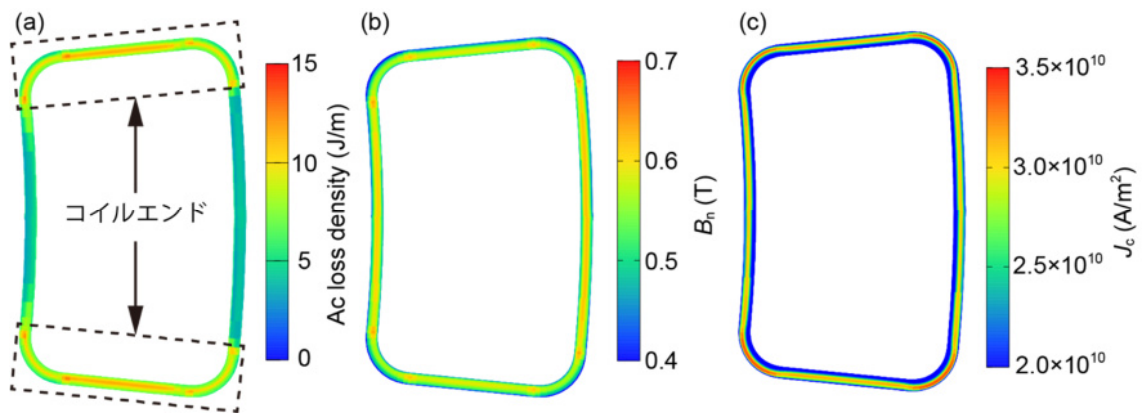


図 3.1-5 機能結合型マグネットを構成する高温超伝導コイルの電磁界解析結果 (a) 交流損失密度分布 (b) 経線垂直磁界成分 B_n 分布 (c) 臨界電流密度 J_c 分布

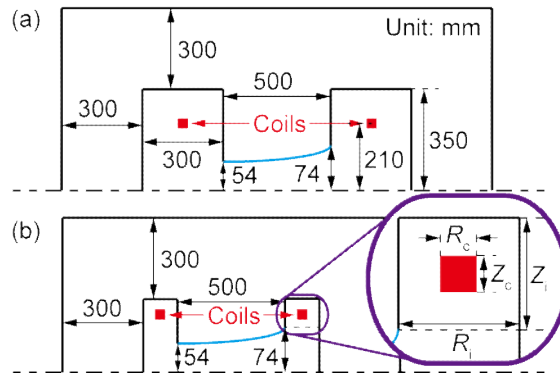


図 3.1-6 解析対象の高温超伝導マグネット断面の概念図 (a) 超伝導コイルと鉄ヨーク間隔が広い設計 (b) 超伝導コイルと鉄ヨーク間隔が狭い設計

表 3.1-3 設計された形状の異なるマグネットの諸元

マグネット 番号	コイル断面 ($R_c \times Z_c$)	鉄ヨーク内空間 ($R_i \times Z_i$)	コイル数・コイル毎 のターン数	高温超伝導線当た りのピーク電流値
1	30 mm × 40 mm	276 mm × 300 mm	8・148	126.2 A
2	35 mm × 50 mm	276 mm × 300 mm	6・176	140.7 A
3	40 mm × 60 mm	276 mm × 300 mm	4・243	153.3 A
4	30 mm × 40 mm	130 mm × 140 mm	8・158	117.7 A
5	35 mm × 50 mm	135 mm × 150 mm	6・191	130.1 A
6	40 mm × 60 mm	140 mm × 160 mm	4・265	140.3 A

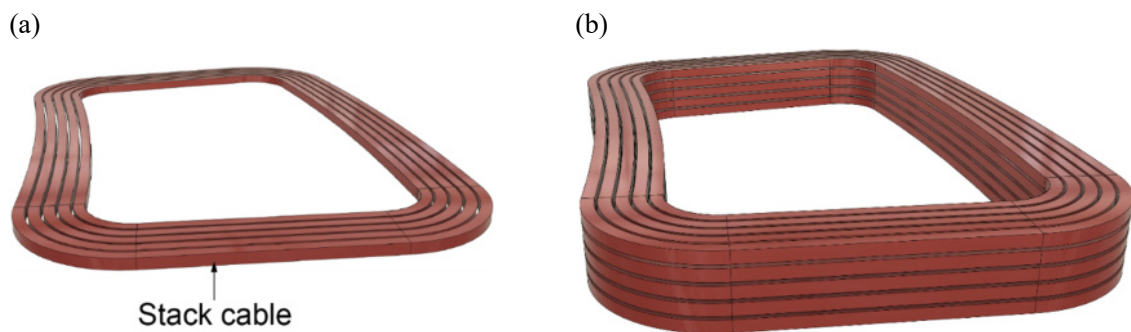


図 3.1-7 スタックケーブルで巻かれたコイル (a) スタックケーブルで構成される変形パンケーキコイル (b) 積層された変形パンケーキコイル

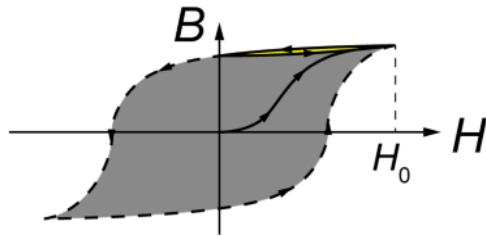


図 3.1-8 一般的な電力機器における磁化履歴(灰色)と解析条件における磁化履歴(黄色)

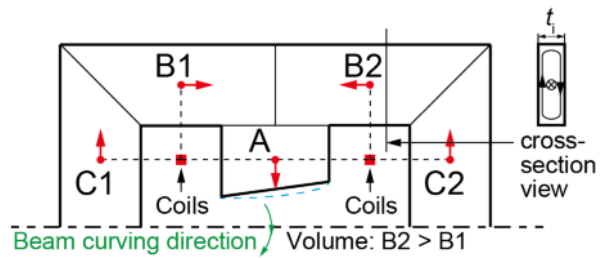


図 3.1-9 鉄シートの概念図

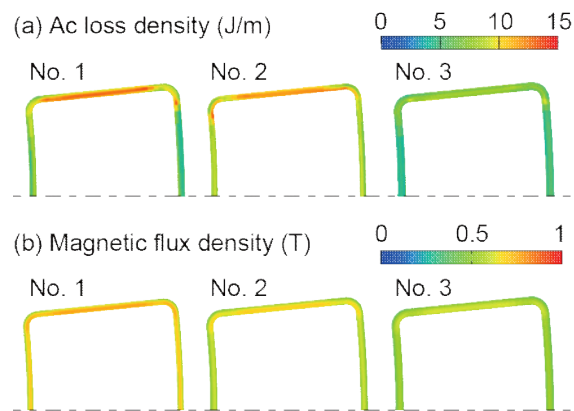


図 3.1-10 マグネット 1 からマグネット 3 を対象とした電磁界解析結果 (a) 高温超伝導線単位長さ当たりの交流損失密度のコイル内分布 (b) 高温超伝導線に対して垂直な磁界成分のコイル内分布

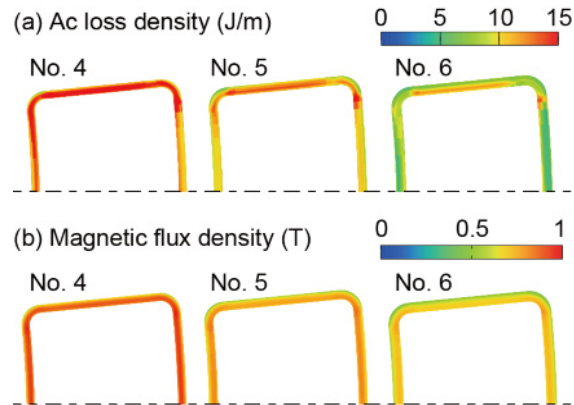


図 3.1-11 マグネット 4 からマグネット 6 を対象とした電磁界解析結果 (a) 高温超伝導線単位長さ当たりの交流損失密度のコイル内分布 (b) 高温超伝導線に対して垂直な磁界成分のコイル内分布

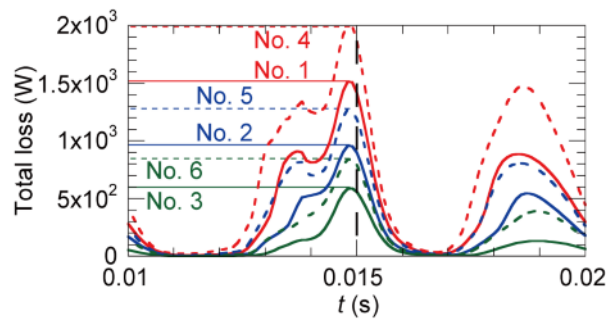


図 3.1-12 マグネット 1 からマグネット 6 までのコイル全体での交流損失の時間変化

表 3.1-4 マグネット 1 からマグネット 6 の電力消費の比較

マグネット 番号	交流損失	冷凍機の 消費電力	鉄損	消費電力
1	0.44 kW	8.8 kW	10.63 kW	19.4 kW
2	0.24 kW	4.8 kW	10.63 kW	15.4 kW
3	0.10 kW	2.0 kW	10.63 kW	12.6 kW
4	0.69 kW	13.8 kW	7.20 kW	21.0 kW
5	0.39 kW	7.8 kW	7.42 kW	15.2 kW
6	0.20 kW	4.0 kW	7.67 kW	11.7 kW

表 3.1-5 マグネット消費電力のまとめ

損失の種類	機能結合型マグネットを使った加速器		
	機能結合型マグネット(1 m + 2 m)		機能結合型マグネット(1 m + 2 m) 大コイル断面 + 小鉄ヨーク
	銅コイル	高温超伝導コイル	高温超伝導コイル
機能結合型マグネットの コイルの損失	740 kW	330 kW	79 kW
機能結合型マグネットの 鉄の損失	350 kW	350 kW	250 kW
4 極マグネットの コイル・鉄の損失	60 kW	60 kW	60 kW
6 極マグネットの コイル・鉄の損失	120 kW	120 kW	120 kW
加速器全体の マグネットの損失	1300 kW	860 kW	510 kW

表 3.1-6 運転温度が 70 K の高温超伝導コイルの諸元

マグネット 番号	コイル断面 ($R_c \times Z_c$)	鉄ヨーク内空間 ($R_i \times Z_i$)	コイル数・コイル毎 のターン数	高温超伝導線当 たりのピーク電流値
7	40 mm × 60 mm	140 mm × 160 mm	6・217	114.3 A
8	60 mm × 60 mm	160 mm × 160 mm	4・326	114.3 A

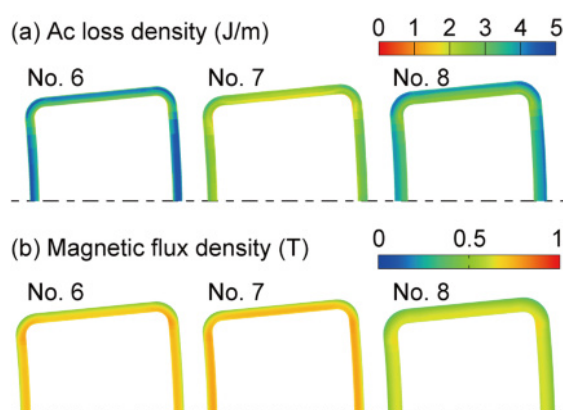


図 3.1-13 マグネット 6 (65 K) とマグネット 7、8 (70 K) を対象とした電磁界解析結果 (a) 高温超伝導線単位長さ当たりの交流損失密度のコイル内分布 (b) 高温超伝導線に対して垂直な磁界成分のコイル内分布

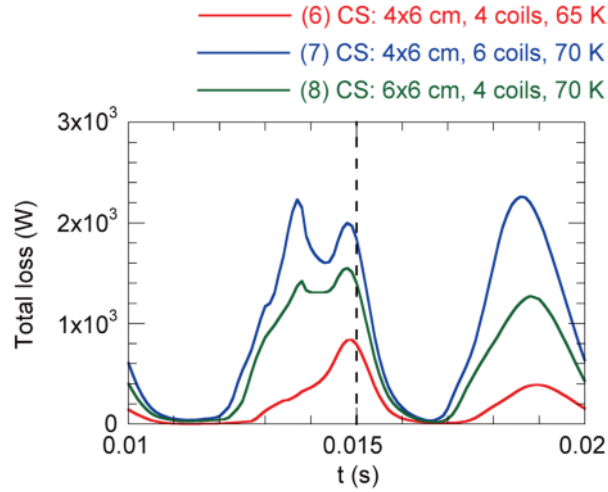


図 3.1-14 マグネット 6 (65 K) とマグネット 7、8 (70 K) のコイル全体での交流損失の時間変化

表 3.1-7 運転温度が異なるマグネット 6 とマグネット 7、8 の電力消費の比較

マグネット 番号	交流損失 (kW)	冷凍機の 消費電力 (kW)	鉄損 (kW)	消費電力 (kW)
6 @65 K	0.20	4.0	7.67	11.7
7 @70 K	0.94	17.1	7.67	24.7
8 @70 K	0.61	11.1	7.81	18.9

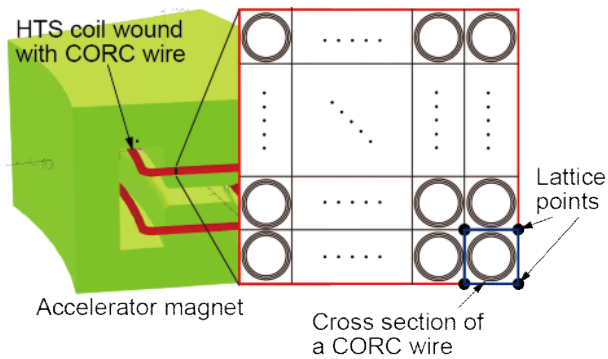


図 3.1-15 CORC ケーブルで巻かれたコイルの断面図

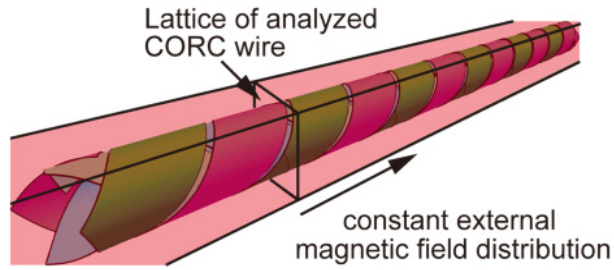


図 3.1-16 CORC ケーブルにおける長手方向外部磁界分布の仮定

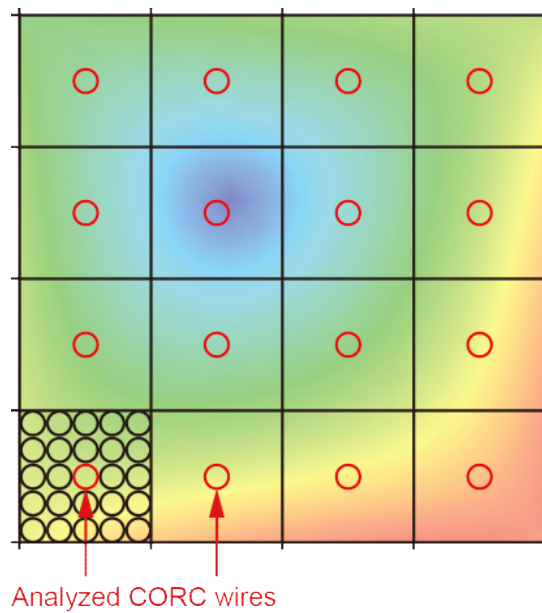


図 3.1-17 コイル断面における解析対象とする CORC ケーブルの選択

表 3.1-8 解析対象とする CORC ケーブルの諸元

層数	3
層ごとの高温超伝導線本数	2
高温超伝導線幅	2 mm
超伝導層厚さ	1.75 μm
周期長	5.6 mm
芯材直径	2.5 mm
積層間隔	45 μm

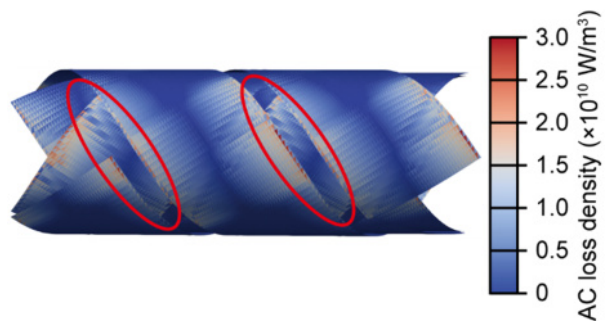


図 3.1-18 CORC ケーブルの 3 次元交流損失密度分布

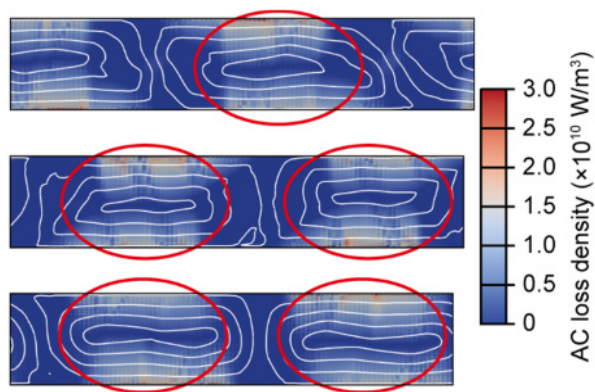


図 3.1-19 3 次元損失分布の展開図及び電流流線図

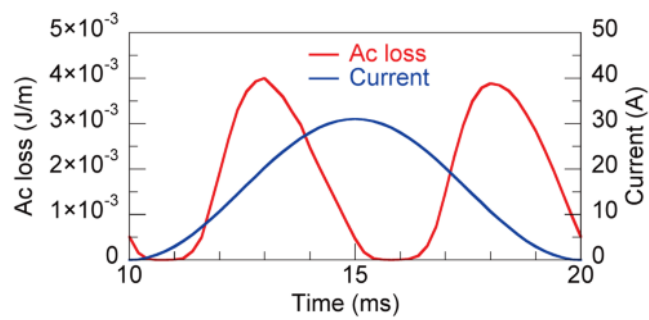


図 3.1-20 CORC ケーブル一本位置周期分における交流損失の時間変化

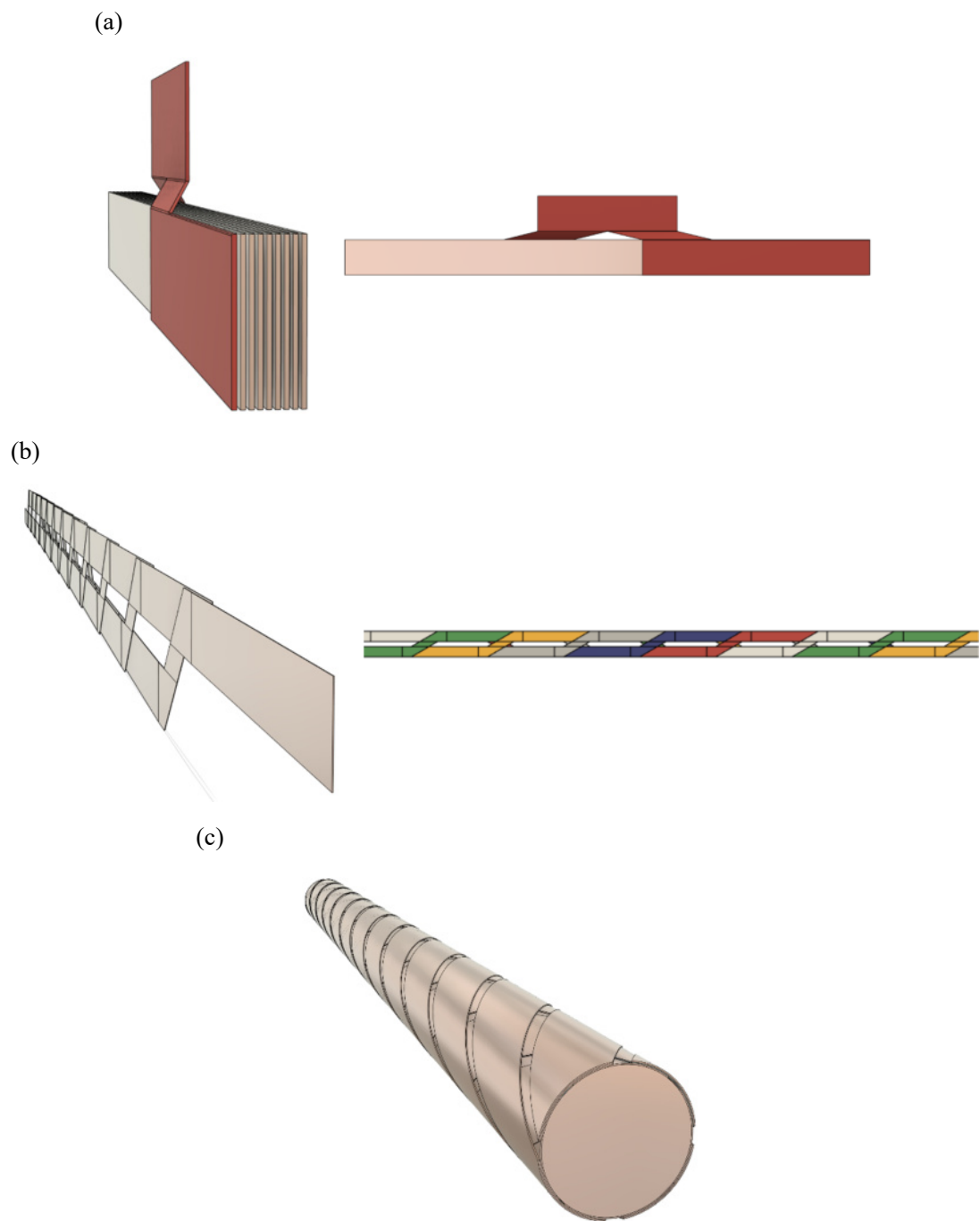


図 3.1-21 高温超伝導集合導体 (a) 転位構造をもつスタックケーブル (b) Roebel ケーブル (c) CORC ケーブル

表 3.1-9 概念設計した加速器システム(最終的な設計)の諸元

使用する主マグネット	機能結合型マグネット
ビーム領域での最大磁界	1.40 T
偏向半径	5.00 m
周長	68.9 m
主マグネットの台数	20 (1 m: 8; 2 m: 12)
主マグネットの有効磁界領域の周方向長さ(偏向角)	1.053 m(11.25°) 2.106 m(22.5°)

表 3.1-10 概念設計した高温超伝導マグネットの諸元

マグネットの磁極長さ	1.053 m(1 m マグネット) 2.106 m(2 m マグネット)
ケーブル	Roebel ケーブル
コイル形状	積層変形レーストラックコイル
アンペアターン(最大値)	74445.7 A
周波数	100 Hz
コイル運転温度	65 K
コイル交流損失*	4.0 kW(1 m マグネット) 4.0 kW(2 m マグネット) 79 kW(加速器 1 基あたり)
鉄損	7.7 kW(1 m マグネット) 15.7 kW(2 m マグネット) 250 kW(加速器 1 基あたり)

*: 冷凍機の効率を 5%と仮定し、消費電力に換算

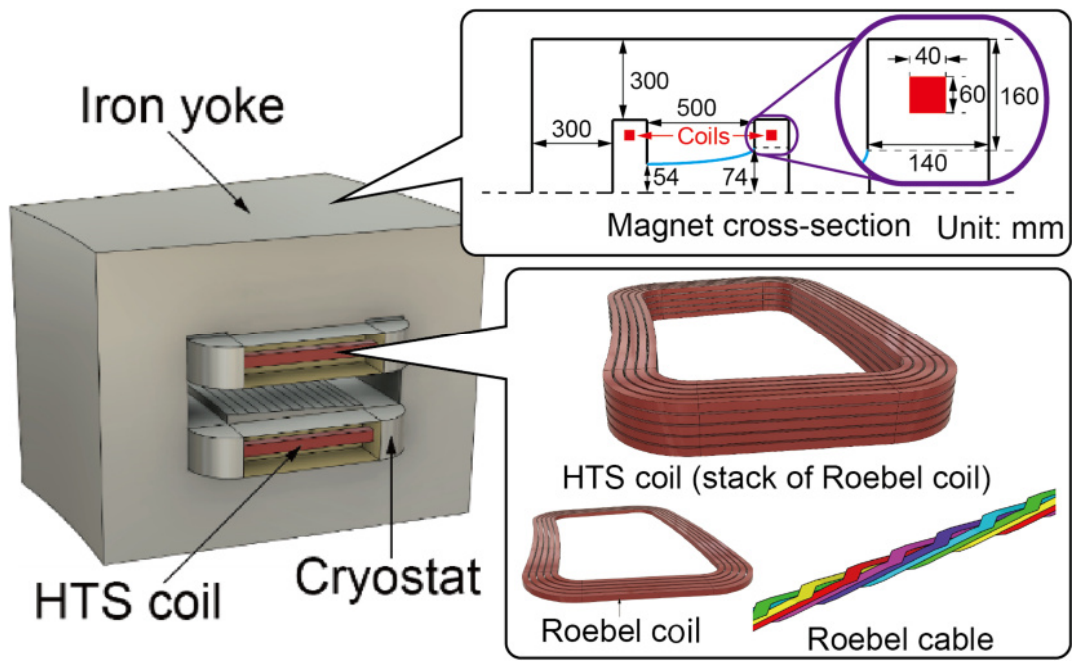


図 3.1-22 最終的に概念設計した高温超伝導マグネット:概念図は 1 m マグネット、鉄芯とコイルの断面形状は 1 m マグネット・2 m マグネット共通

3.2 低加速消費電力・高ビーム出力加速器システムの研究開発

3.2.1 ビーム光学系の基本設計

本研究における ADS 駆動用加速器には高繰り返しシンクロトロン (RCS: Rapid Cycling Synchrotron) 方式を採用し、陽子ビームを 100 MeV から 1.5 GeV に加速する。ビーム電流は 1 mA を目標とする。ビームの基本仕様を表 3.2-1 に示す。ビームを安定に偏向・集束させるための装置(主に 2 極及び 4 極マグネット)の磁界強度や磁界勾配及びその配置に関する設計がビーム光学設計である。このビーム光学系の設計にあたり、設置面積を小さくしてシステム全体を低コスト化することと、高繰り返し運転での加速空洞の電圧を低減する目的で、シンクロトロンの周長を極力小さくすることを基本方針とした。円形加速器の周長が半分になると、単位時間当たり粒子が高周波加速装置を通過する回数が 2 倍になり、加速電圧(電界と加速距離の積)が半分で済むことから、高周波加速装置の数を半減させることができ、その結果、高周波加速装置での消費電力を減らすことができる。

(1) 線形光学系の設計確立【H28】

シンクロトロン等のリングやビーム輸送系では、2 極マグネットや 4 極マグネット等により、ビームを設計軌道に合わせて偏向させたり収束させたりしながら、ビームは安定に保たれる。その際、これらのマグネットの磁束密度を適正な値に設定し、適切に配置する必要がある。このマグネットの配置をラティスと呼ぶ。本研究の RCS のラティス設計に際し、シンクロトロンの周長を小さくするため、メインマグネットには機能結合型(Combined function)のマグネットを採用した。機能結合型マグネットは、ビームの偏向に用いる 2 極マグネットとビームの収束に用いる 4 極マグネットの機能を併せ持つマグネットである。2 極マグネットと 4 極マグネットを独立に設置する必要がないため、周長を短くできるという長所がある反面、ベータatronチューンの可変領域が狭く、運転パラメータの自由度が少ないことが弱点となる。しかしながら、ADS 用加速器では、ベータatronチューンを大きく変えて運転することは想定されないため、本研究では機能結合型マグネットを使ったラティスを採用した。ここで、ベータatronチューンについて説明する。円形加速器中のビームは、閉じた軌道(閉軌道)の周りを微小振動しながら周回する。この振動をベータatron振動と呼ぶ。ベータatronチューンとは、リング 1 周当たりのベータatron振動の波数のことをさし、一次近似では加速器の磁界分布で決まる。水平および垂直方向のベータatronチューンをそれぞれ ν_x , ν_y とすると式 3.1-1 の条件をみたすとき、ベータatron振動の共鳴によりビーム不安定性を引き起こす恐れが生じるため、ベータatronチューンには整数・半整数等はさけ、半端な数が選ばれる。ここで k , m , n は整数である。

$$k\nu_x + m\nu_y = n \quad (3.1-1)$$

機能結合型マグネットを使った加速器のラティスの平面図を図 3.2-1(左)に示す。本研究では超伝導マグネットを用いるが、その主な目的は低消費電力化である。磁束密度分布を形成するためにコイル分布ではなく鉄の磁極を用いることから、最大磁束密度は 1.4 T と超伝導マグネットとしては比較的低い値に抑えている。また、超伝導マグネットの製作性を考慮し、ビーム進行方向の長さは 1 m 程度とした。全体の周長は 68.9 m となり、6 m の長直線部が 4 箇所確保できている。これらのうちの 2 箇所は加速空洞を設置し、残りの 2 箇所はビーム入射と取出し機器を配置した。

ラティスの特性を示す関数を図 3.2-1 (右)に示す。ベータロンチューンは水平・垂直それぞれ $(\nu_x, \nu_y) = (3.70, 2.74)$ とした。3.3節で述べるように、本研究ではビーム取出しに $3\nu_x = 11$ の共鳴を用いるため、入射及び加速の際の水平ベータロンチューンにはこの共鳴の近傍の値 3.70 を選んだ。ベータロン振動の共鳴は一般には避けるべきであるが、共鳴現象を適切に制御することで、ビーム取出し等に有効に用いることが可能である。なお、色収差はビーム取出しの調整に用いるため、水平方向は-1.25 に、垂直方向はゼロに補正する。

加速器中のビームの運動量は1%程度のばらつきを持っている。運動量の設計値 p に対してズレ dp をもつ粒子は、中心軌道に対し変異 $\Delta x(s) = \eta(s)dp/p$ 持って周回する。 $\eta(s)$ は分散関数と呼ばれ加速器のラティスが決まると関数形が決定する量である。運動量の異なる粒子に対する周長 C の変化率 $\Delta C/C$ は、 $\eta(s)$ の汎関数 $\alpha[\eta]$ を使って $\Delta C/C = \alpha dp/p$ とかける(式 3.2-2)。

$$\alpha = \frac{1}{C} \oint \frac{\eta(s)}{\rho(s)} ds \quad (3.2-2)$$

ここで $\rho(s)$ は設計軌道の曲率半径である。 α はモーメントコンパクションファクタと呼ばれ、リング周長 C とともに高周波系の設計に極めて重要なパラメータで、3.2.2 の設計検討に用いられている。

大強度ビーム加速器で問題となる現象の一つに、ビームの持つ空間電荷が引き起こすベータロンチューンシフト(チューンのずれ)がある。チューンシフトが大きくなるとベータロン振動の共鳴の影響でビームが失われてしまう。チューンシフトは主にビーム強度・ビームサイズ等に依存し、ビームサイズが小さいほどチューンシフトは大きくなるため、ビームサイズをある程度大きくする必要がある。このラティスではビームが安定に周回し加速されるために、ビームサイズは水平方向 200 mm、垂直方向 100 mm 必要である。表 3.2-2 に機能結合型マグネット 32 台を使った加速器の基本パラメータをまとめる。

(2) 非線形ビーム挙動の定量化【H29】

加速器を構成するマグネット群の発生する磁界の非線形成分が、加速器を周回するビームに与える影響の評価を行った。磁界の非線形成分の発生源は主として以下のものが考えられる。

1. 色収差補正用 6 極磁界
2. 主偏向マグネット端部

本項目ではこれらの磁界成分がビームの性質(色収差及び動的口径)に与える影響を評価した。なお、この他に共鳴励起用 6 極マグネットが発生する磁界の影響もあるが、その効果は 3.3.1 に記述する。

① 色収差補正用 6 極磁界

設計エネルギー E_0 を持った基準粒子(運動量 p_0)に対するこれらのラティスの水平方向、鉛直方向のチューンは $(\nu_x, \nu_y) = (3.70, 2.74)$ である。基準粒子のエネルギーと異なるエネルギーを持った粒子(運動量 p)に対しては、各偏向・集束マグネットから受ける力がエネルギーに応じて異なるため、チューンの値も変化する。すなわち δ を基準粒子の運動量からの相対的なズレとして $\delta = (p - p_0) / p_0$ とした場合に、チューンが δ の関数として $\nu_x(\delta), \nu_y(\delta)$ のように表される。この変化の大きさが色収差と呼ばれる量であり、

$$\xi_{x,y}(\delta) = \frac{d v_{x,y}(\delta)}{d \delta} \quad (3.2-1)$$

と定義される。これらの水平方向・鉛直方向の色収差を抑制するために、ラティスに 6 極磁界を導入する必要がある。

偏向磁界と集束磁界の両者の磁界を発生する主結合型マグネット(図 3.2-1 中の BF 及び BD) 6 極磁界成分を重畳して発生させることで色収差補正磁界成分を印加する方式を採用した。この方式を採用することで、主結合型マグネットの磁極形状に微修正を施すことで色収差補正磁界成分を発生可能であり、追加の励磁用電源も不要である。また、広い範囲に 6 極磁界を分布させることで磁界の 6 極磁界成分の最大強度を低減させることができ、ビームへの非線形な影響を抑制することも期待できる。このような 6 極磁界成分を重畳する方針のもと、BF 及び BD に印加させる色収差補正に必要な 6 極磁界成分の大きさを、先の機能分離型マグネットを使ったラティスと同様の算出方法により決定した。その結果 BF: 0.070 T/m²、BD: -0.235 T/m² の強度で 6 極磁界を発生させることで、色収差を補正前の値である(ξ_x, ξ_y) = (-9.6, -8.8)から、色収差の設計値である(ξ_x, ξ_y) = (-1.25, 0.0)まで補正できることが示された。

ビームの安定な加速と共鳴ビーム取出しの実現においてラティスの色収差の補正は不可欠であるが、色収差補正のために導入した 6 極磁界成分はビームの水平方向・鉛直方向の変位に対して非線形に作用する。このような非線形な磁界成分の存在下では、ビームが安定に周回可能な空間的な領域の大きさ(ベータatron振動の振幅)が制限されることが知られている。この領域の大きさを動的口径と呼ぶ。この動的口径の大きさを評価するために色収差補正したラティスに対してビームの輸送シミュレーションにより安定領域の大きさを計算した。結果を図 3.2-2 に示す。この図より動的口径の大きさは 150 cm 程度である。本研究で検討している高繰り返しシンクロトロンでは、100 Hz の繰り返しで平均 1 mA の陽子ビームを加速する必要がある。この大電流のビームが発生する空間電荷効果の影響を抑制して安定に加速するためには、ビームダクトの大きさをビーム幅の最大となる場所で 20 cm 程度とする必要がある。したがって、動的口径は必要なビームダクトの大きさに対して十分大きいと言える。

② 主マグネットの端部磁界

ここまでの検討で対象としていたマグネットは端部を理想的なものとして扱っていた。すなわちマグネット端部からの磁界の滲み出しがなく、端部において急激に磁界の大きさが 0 になるものと仮定していた。実際のマグネットでは端部から磁界が滲み出しており、この磁界は非線形な磁界成分を含んでいる。そのため実際の加速器の設計においては端部磁界を考慮する必要がある。特に本研究では主マグネットの低消費電力化を一つの目標としており、コイルにおける交流損失や磁極内部の渦電流損失の低減のための磁極形状に対する多様なケーススタディが必要になる。そのためマグネット端部の磁界成分の影響を評価するための計算体系の構築を図った。この計算体系において、3 次元磁界分布計算により算出された磁界を多重極展開することで非線形成分を含む多極磁界成分の大きさを評価し、その多極磁界成分がビームに与える影響を粒子輸送計算により評価している。その結果、マグネット端部において最大で 0.6 T/m² の 6 極磁界成分が存在し、その影響で動的口径が 20 cm まで制限されるという結果が得られた。このようにマグネット端部の非線形磁界成分の影響が評価可能であり、今後の磁極形状の最適化の基礎となる計

算体系が構築できたとと言える。

(3) 交流損失低減設計のビームへの影響の定量化【H30】

平成 29 年度は主に加速器を構成する主マグネット群が発生する磁界の非線形成分が、加速器を周回するビームに与える影響の評価を行った。平成 30 年度はそれに加えてマグネット磁極端部で発生する磁界の非線形成分の影響を評価した。加えて、交流損失を低減したマグネット設計からのフィードバックにより、一部のマグネット実効長を 2 倍に伸ばし、マグネット台数を削減した加速器を設計した。

① マグネット端部の鉄芯磁化飽和による多極成分の影響

磁極端部では磁界飽和の影響により多極成分が発生するため、ビームが安定に周回できる領域、すなわち動的口径の評価が必要である。本検討では、飽和による多極成分がより大きく出ると予想される機能結合型マグネットを対象とした。図 3.2-3 はマグネットの鉄芯構造であり、3 次元磁界計算に用いた鉄芯モデルである。磁極端部は磁束が集中するため、磁化飽和を起こしやすい。磁化飽和が発生すると予期せぬ多極磁界成分が発生し、ビームの周回を不安定にする恐れがある。磁化飽和を緩和するため、磁極端部付近にエアギャップを設け、磁性体の密度分布を調整できる設計とした。エアギャップによる磁化飽和緩和を施した機能結合型マグネットの 3 次元磁界計算結果を図 3.2-4 に示す。

主マグネット端部での飽和の影響を考慮した場合の位相空間構造を図 3.2-5 に示す(ドーナツの空洞部分は、シミュレーションは省略した)。このシミュレーションに用いた磁束密度分布を計算する際に用いた磁極モデルには磁化飽和緩和のためにエアギャップを設けている。シミュレーションの結果、ビームダクト径に比べて十分広い動的口径が得られていることがわかる。

② 主マグネット交流損失低減設計から加速器設計へのフィードバック

研究項目(1)a「低交流損失高温超伝導マグネットの設計」の検討結果から、主な交流損失はマグネットコイル端部で発生することがわかった。このため、主マグネットのコイル端部の総延長を短くすることが交流損失の低減に有効である。機能結合型マグネットの実効長を 1 m から 2 m に伸ばすことがビーム光学と超伝導コイル製作性の観点から可能であれば、主マグネットの台数を削減することができる。

マグネットの一部を 1 m から 2 m に伸ばしたラティスを検討した。これまでは全ての主マグネットの実効長を 1 m としてリングを設計していた。この場合、90 度のアーク部が

BF BD BD BF BF BD BD BF

という並びになっており、8 台のマグネットで構成される(リング 1 周で 32 台)。BF、BD(収束、発散)の同種類で連続的に配置されているマグネットをまとめて、

BF BD2 BF2 BD2 BF

とすると 90 度のアーク部はマグネットの台数を 5 台に削減できる(リング 1 周で 20 台)。このとき、アーク部入り口と出口の BF の実効長は安定したビーム光学系を確保するため 1 m のままとした。図 3.2-6 に機能結合型マグネット 20 台を使った加速器のラティスの平面図(左)とそのラティス関数(右)を示す。また、表 3.2-3 にこの加速器の基本パラメータをまとめる。主マグネット 20

台の場合でも安定したビーム光学系を構成することが可能であることがわかった。

(4) 最適化された磁界でのビーム安定性の定量化【R1】

研究項目(1)a「低交流損失高温超伝導マグネットの設計」検討結果から主マグネットの3次元磁界計算に基づく磁極端部での多極磁界成分の評価を行った。具体的にはこれらの多極成分の影響評価を、ビームシミュレーションを用いて実施した。この分布はミッドプレーン上における磁界のミッドプレーンに垂直な成分 B_y として与えられる。この分布を用いて以下の手順でビームシミュレーションを行った。

- A) 磁界分布は有限なメッシュ点で与えられるため、任意の位置での磁界成分を図 3.2-7 で表される線形補間を用いて求める。
- B) 上記の磁界成分を用いてミッドプレーン上でのビーム軌道を4次のルンゲ-クッタ法で求める。
- C) このビーム軌道を中心に B_y を多重極展開する。
- D) 多重極成分を用いてビームシミュレーションを行う。

上記の手順で行ったシミュレーション結果を図 3.2-8 に示す。この図は長直線部中心でのビーム位相空間構造である。水平・垂直両方向ともダクトサイズに比べ十分広い動的口径が得られることがわかった。さらに、定量的な評価を行うため、サバイバルプロットにより評価した。サバイバルプロットとはビームの初期振幅を横軸に取り、ビームがある閾値を超えないで周回できる周回数を縦軸に取ってプロットしたものである(図 3.2-9)。入射エネルギー100 MeV から取り出しエネルギー1.5 GeV まで加速するために必要な周回数は約 14,000 ターンなので、ビーム安定性は十分確保されていることがわかる。図 3.2-9 のプロットのための計算では閾値を 1 m とした。

3.2.2 ビーム加速シナリオの詳細検討

シンクロトロンにおける加速は高周波加速方式を用いる。高周波加速とは、粒子集団が高周波加速装置の周波数に追従して特定のエネルギーに収束される(位相安定性の原理)ことを利用し、周波数を徐々に変化させることによってビームを加速する方法である。周波数の変化を速くすればより速く加速されるが、高周波バケツとよばれる位相空間の安定領域は狭くなりビームが失われやすくなる。高周波加速には、高周波加速装置を用いる。これはビームを加速するための電界を発生させる装置である。円形加速器では、ビーム周回周波数の整数倍(この数をハーモニック数という)に相当する周波数の高周波電界を印加する。超相対論的エネルギー(速度がほぼ光速)に満たないエネルギーの陽子シンクロトロンでは、加速の際、周波数をビームエネルギーに応じて変化させる。

また、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と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。これは位相安定性の原理と呼ばれ、シンクロトロンにおけるビーム加速が安定に行えるのはこの原理によるものである。この原理に基づいて粒子が縦方向位相空間で行う非線形振動をシンクロトロン振動と呼び、シンクロトロン振動の安定領域が前述の高周波バケツであ

る。

本稿の 3.2.1 より加速器の周長は 68.9 m である。このとき運動エネルギー 0.1–1.5 GeV の陽子の周回周波数は 1.8–4.0 MHz の範囲にある。ハーモニック数を 1 と設定するならば、この周波数帯では金属磁性体を装填した高周波加速装置を用いることにより 20 kV/m 程度の加速勾配は十分期待できる。長直線部の約半分を高周波加速装置に利用できるとし、機能結合型では一周当たり最大 200 kV、機能分離型では一周当たり最大 400 kV の高周波加速電圧振幅が得られることを前提として運転パターン設計を行った。

具体的に高周波加速装置の運転パターンとは、時間の関数で表された高周波電圧振幅 $V(t)$ 及び周波数 $f(t)$ のことである。高周波電圧振幅は大きいほど加速は速く、また縦方向の位相空間でより広い範囲の粒子を加速することができる。他方、周波数は同期する粒子のエネルギー E_s に直接対応し、その変化速度が速いほど加速は速くなる。当然、一周当たりの同期エネルギーの変化 dE_s は qV (q は粒子の電荷) より小さい必要があり、 qV に近いほど位相空間で粒子が安定に運動する領域は狭くなる。 $dE_s = qV \sin \phi_s$ と書いたとき ϕ_s を同期位相と呼ぶ。ビームを構成する粒子集団は、この同期位相を中心としたかたまり(バンチ)となって加速される。高周波が作る縦方向位相空間の安定領域は高周波バケツと呼ばれる。

高周波加速装置の運転パターンは、常にビームの粒子分布形状を意識しながら設計しなければならない。シンクロトロンの入射器は線形加速器を想定しており、 $\pm 0.1\%$ (標準偏差) 程度の運動量広がりを持った連続ビームが入射されると考えられる。加速に先立って、このビームを高周波バケツに整合するように整形する必要がある。

(1) 高周波運転パターンの確立【H28】

加速ステージでは常に最大の高周波加速電圧振幅を印加し、さらに粒子集団との整合を維持するために高周波バケツの面積を一定に保つことを条件とした。この条件のもとでは、粒子が収束される高周波の位相(同期位相)はエネルギーとともに上昇させなければならない。

さらに、加速に先立って入射ビームをバンチに整形するため断熱捕獲を行った。断熱捕獲は入射ビームに同期した周波数の高周波を徐々に電圧振幅を上昇させながら印加する方法で、シンクロトロン振動(→注:位相安定性の原理)と比較して十分時間をかけて行えばエミッタンスを増加させることなく分布形状を変化させることができる。捕獲後には、粒子集団を加速位相に滑らかに移動させるための平滑化ステージを設けた。

ビーム入射から取出しまでの高周波加速装置の運転パターンを図 3.2-10 に示す。初めの 1 ms は断熱捕獲ステージで、高周波バケツの面積が一定の変化率で増加するように高周波電圧を増加させている。このステージでは加速を行わないので、周波数は入射エネルギーに対応する値に固定されている。続く 0.19 ms は捕獲から加速までの間をつなぐ平滑化ステージで、加速位相を一定速度で上昇させている。その際、高周波電圧振幅も増加させて、高周波バケツの面積を一定に保つように調整されている。最後の 3.61 ms は加速ステージで、この区間では最大の高周波電圧振幅(200 kV)を用いつつバケツの面積を一定に保って加速している。バケツの面積は同期エネルギーの減少関数であるため、加速に伴って同期位相が上昇している。

種々のパラメータは、総加速時間が 5 ms に収まるように選び、その結果加速位相は最大 56 度、総加速時間は 4.8 ms、高周波バケツの面積は 2.0 eVs となった。最終的な粒子分布は図 3.2-11

に示すようになり、高周波バケツには十分余裕があることがわかる。

ビーム取出しのための共鳴条件の制御に色収差(エネルギーによってベータロンチューンが異なること)を用いることが、本加速器設計の特色である。以下のとおり、共鳴条件の高速制御に関する条件決定を行った。図 3.2-10 の運転パターンでは、最終エネルギー近傍での加速スピードは機能結合型モデルで 168 keV/turn である。これは相対的な運動量(dp/p)の変化速度に換算すると 0.008/100 turn に等しい。共鳴に必要なベータロンチューンの変化速度を仮に 0.01/100 turn とするならば、必要な色収差は-1.25 程度以上が目安となる。

(2) 磁性体高周波特性の定量化【H29】

本研究で検討している加速器では、ビーム捕獲部を除く加速時間が 3.8 ms(機能結合型マグネットを使った加速器)または 2.9 ms(機能分離型マグネットを使った加速器)と非常に短く、この間に加速高周波の周波数をそれぞれ 1.8-4.0 MHz または 1.2-2.6 MHz と、いずれも約 2 倍の範囲で変動させなければならない。したがって、この加速器の高周波加速装置は十分広い周波数帯域と速い応答性を持つ必要がある。本項目では、広帯域のインピーダンスを特長とする金属磁性体を装荷した試験空洞を用いて、このような速い周波数変調が実現可能であることを実証した。

① 磁性体特性評価試験準備

金属磁性体 2 枚を装荷した試験空洞と 100 kW 電力増幅器を組み合わせた特性評価試験装置を組み立てた。入力する高周波は任意波形発生装置によって生成され、その振幅と周波数は時間の任意の関数として与えられる。また、試験空洞に発生する高周波は高電圧プローブによって測定し、オシロスコープによって振幅の時間変化を、フーリエ解析によって周波数の時間変化を測定する。

② 高周波運転パターンの印加による磁性体特性評価試験

平成 28 年度決定した加速パターンのうち捕獲部を除いた加速パターンを任意波形発生器より試験空洞に入力し、空洞に発生する電圧を高電圧プローブにて測定した。図 3.2-12 に測定の様子を示す。ただし、振幅は一定値として与えた。出力波形をフーリエ解析して求められた周波数パターンを図 3.2-13 に示す。周波数に関しては、意図していた通りの速い変調が実現できていることが確認された。一方電圧振幅に関しては、いずれも低周波側で若干の低下が見られ、機能結合型マグネットを使った加速器の場合には最大約 2 割減、機能分離型マグネットを使った加速器の場合には約 5 割であった。これは磁性体の周波数特性によるもので、加速間隙の静電容量を上げて共振周波数を下げるか、または入力の電圧振幅を調整することで補償可能であると期待できる。表 3.2-4 に高周波加速に関するパラメータをまとめる。

3.2.3 まとめ

高エネルギーかつ大電流ビームの安定供給は、ADS 駆動用加速器として要求される基本性能である。これらに加え、省スペース並びに低加速消費電力化は ADS の実用化には不可欠である。本研究では、ビームエネルギー 1.5 GeV、ビーム電流 1 mA の高繰り返しシンクロトロン設計を行い、図 3.2-6、表 3.2-3 のような機能結合型マグネットを使った加速器の概念設計に成功した。

主マグネットの磁束密度はスーパーフェリックマグネットに対応するため 1.4 T を上限とし、2 極・4 極・6 極磁界の機能を合わせ持つ機能結合型マグネットを採用することで、周長 68.9 m という省スペース化を実現した。さらに 6 極磁界も主マグネットに含めることにより、非線形力を分散させ、ビームの不安定性を抑え、十分な横方向のビーム安定領域を確保した。また、高繰り返し運転に必要な高周波運転パターンを最適化することにより、繰り返し 100 Hz を可能とする速い運動量変化を実現すると同時に縦方向のビーム安定性も確保した。ここで、高周波系での消費電力は 3.6 MW となった。

表 3.2-1 ビーム基本仕様

ビーム種	陽子
入射エネルギー	100 MeV
取出しエネルギー	1.5 GeV
平均ビーム電流	1 mA
運転繰り返し	100 Hz

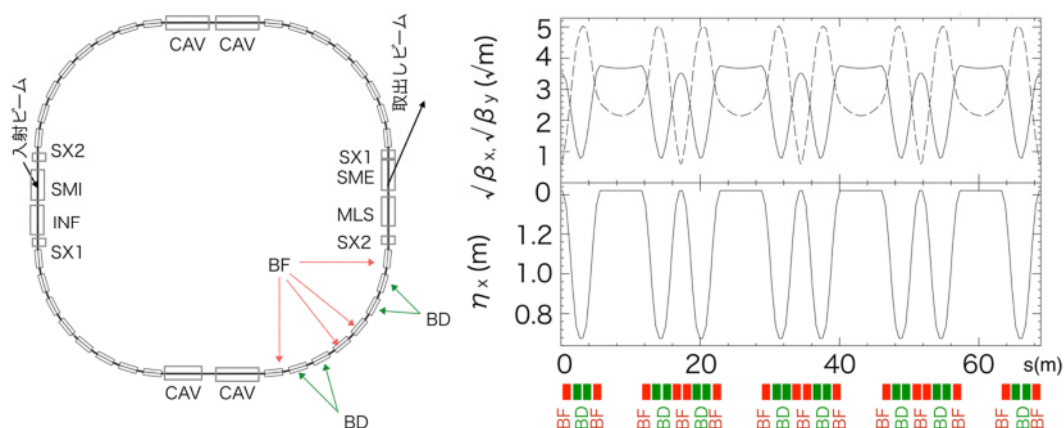


図 3.2-1 機能結合型マグネット 32 台を使った加速器:(左)ラティス(マグネットの配置)の平面図、(右)ラティス関数。左図において、メインマグネットの配置は 4 回の回転対称性を持つ。BF は水平方向に収束機能(垂直方向に発散機能)をもつ機能結合型マグネット、BD は水平方向に発散機能(垂直方向に収束機能)をもつ機能結合型マグネット、SMI・INF はビーム入射機器、CAV は加速空洞、SX1 及び SX2 は取出しに用いる共鳴励起用 6 極マグネット、MLS・SME はビーム取出し機器を示す。また右図において、上段の図中の横軸はビーム軸に沿った距離 s 、縦軸の実線及び破線は、それぞれ規格化された水平及び垂直方向のビームの包絡線である(これはベータ関数の平方根に相当する)、下段の実線は分散関数を表している。

表 3.2-2 機能結合型マグネット 32 台を使った加速器の基本パラメータ

対称性	4
最大磁束密度	1.40 T
曲率半径	5.36 m
周長	68.9 m
機能結合型マグネットの数	32
偏向角	11.25 degree
機能結合型マグネットの長さ	1.053 m
長直線部の数	4
長直線部の長さ	6.00 m
ベータatronチューン	(3.70, 2.74)
モーメントムコンパクションファクタ	0.09
補正後の色収差	(-1.25, 0)

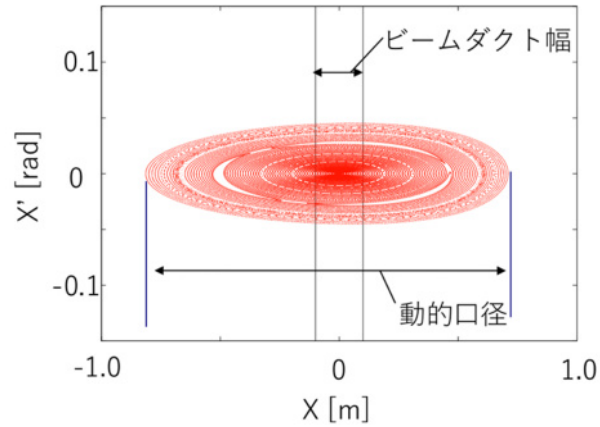


図 3.2-2 機能結合型マグネット 32 台を使った加速器の色収差補正後の安定軌道評価結果。図中赤色で示した閉曲線が水平方向の位相平面上における安定軌道を示している。最外部の閉曲線が安定領域の境界であり、その幅が動的口径である。

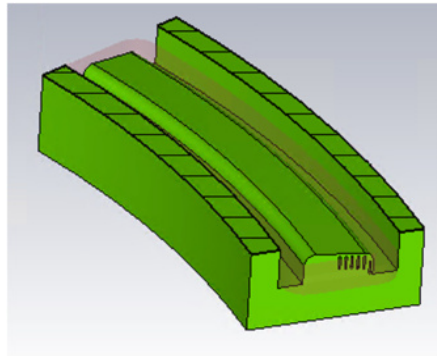


図 3.2-3 機能結合型マグネットの鉄芯構造。機能結合型マグネットの 3 次元磁界計算に用いた鉄芯モデル。磁極端部は磁束が集中するため、磁化飽和を起こしやすい。磁化飽和が発生すると予期せぬ多極磁界成分が発生し、ビームの周回を不安定にする恐れがある。磁化飽和を緩和するため、磁極端部付近にエアギャップを設け、磁性体の密度分布を調整できる設計とした。

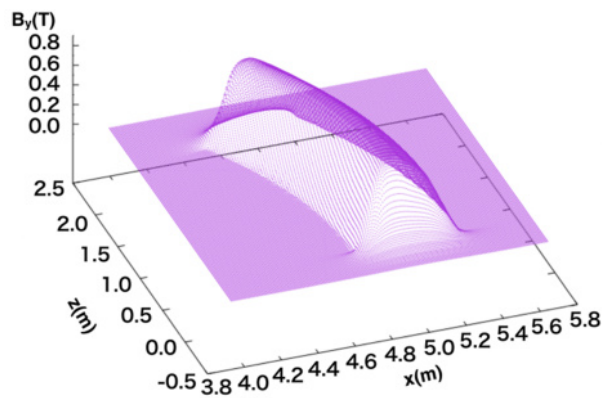


図 3.2-4 3次元磁界計算結果から得られた磁界分布。

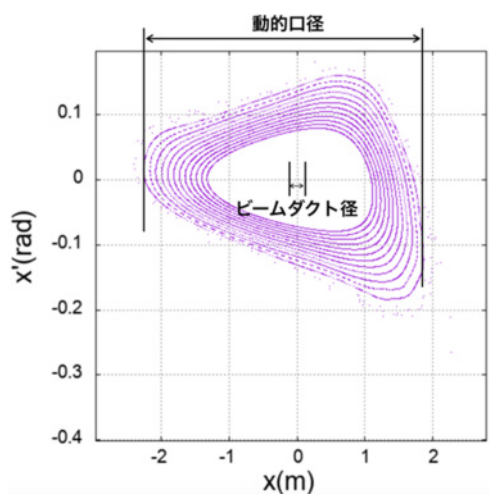


図 3.2-5 機能結合型マグネットを使った加速器における位相空間構造 (飽和の影響あり)。主マグネット端部での飽和の影響を考慮した場合。ドーナツの空洞部分のシミュレーションは省略した。磁極には磁化飽和緩和のためにエアギャップを設けている。

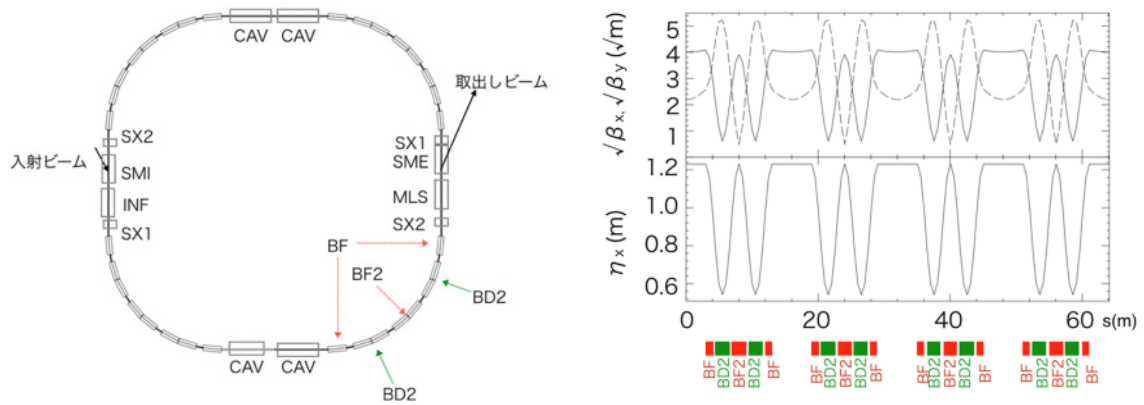


図 3.2-6 機能結合型マグネット 20 台を使った加速器:(左)ラティス(マグネットの配置)の平面図、(右)ラティス関数。それぞれの関数は図 3.2-1 左図と同じ定義である。

表 3.2-3 機能結合型マグネット 20 台を使った加速器の基本パラメータ

対称性	4
最大磁束密度	1.40 T
曲率半径	5.36 m
周長	68.9 m
機能結合型マグネットの数	20
偏向角	11.25 degree (8 台) 22.5 degree (12 台)
機能結合型マグネットの長さ	1.053 m (8 台) 2.106 m (12 台)
長直線部の数	4
長直線部の長さ	7.625 m
ベータトロンチューン	(3.70, 2.74)
モーメントムコンパクションファクタ	0.08
補正後の色収差	(-1.25, 0)

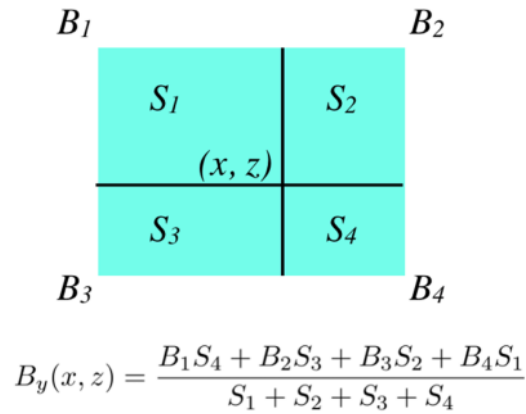


図 3.2-7 線形補間の説明図。3次元磁界計算で得られた磁界分布から、ミッドプレーン上の任意の点(x, z)におけるミッドプレーンにたいして垂直な磁界成分を求める線形補間法を説明している。

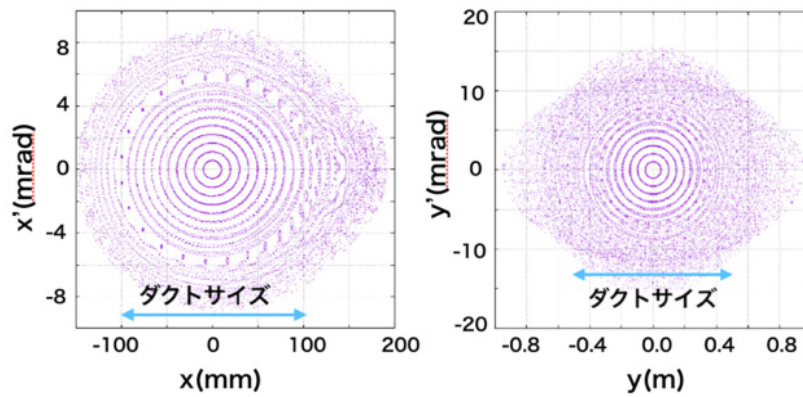


図 3.2-8 長直線部中心でのビーム位相空間構造。端部の多極磁界成分を考慮したビームシミュレーション結果。ダクトサイズに対して十分な安定領域が得られている。

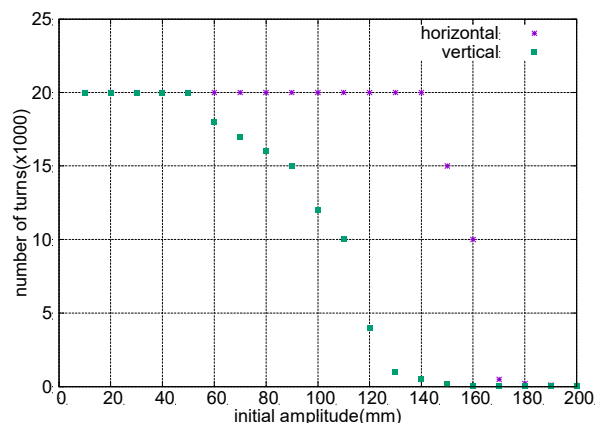


図 3.2-9 主マグネットの端部での多極磁界成分を考慮したビームシミュレーションのサバイバルプロット。

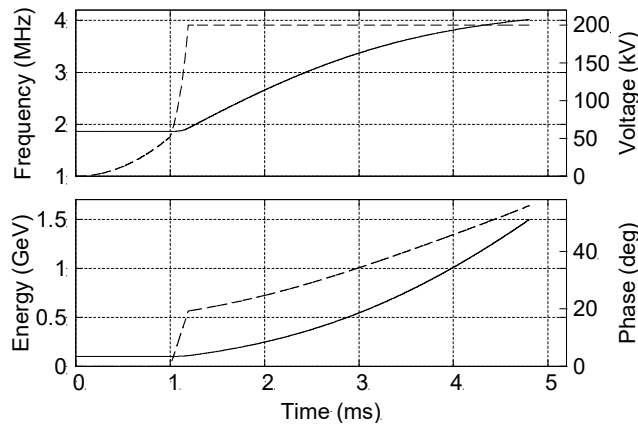


図 3.2-10 高周波加速装置の運転パターン。機能結合型マグネットを使ったラティスに基づいて設計した高周波加速装置の電圧 (Voltage) 及び周波数 (Frequency) のパターンと、その時の同期位相 (Phase) と同期エネルギー (Energy)。実線は左の縦軸、破線は右の縦軸に対応。横軸はすべて共通。

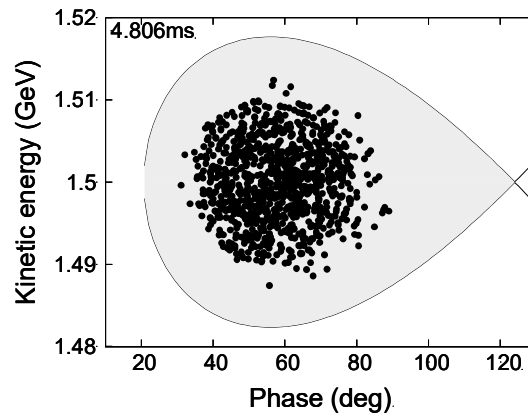


図 3.2-11 加速終了時の縦方向位相空間での粒子分布。横軸は高周波に対する位相 (phase)、縦軸は粒子の運動エネルギー (kinetic energy)。高周波バケツ領域を灰色で示した。



図 3.2-12 試験空洞による高周波電場測定の様子

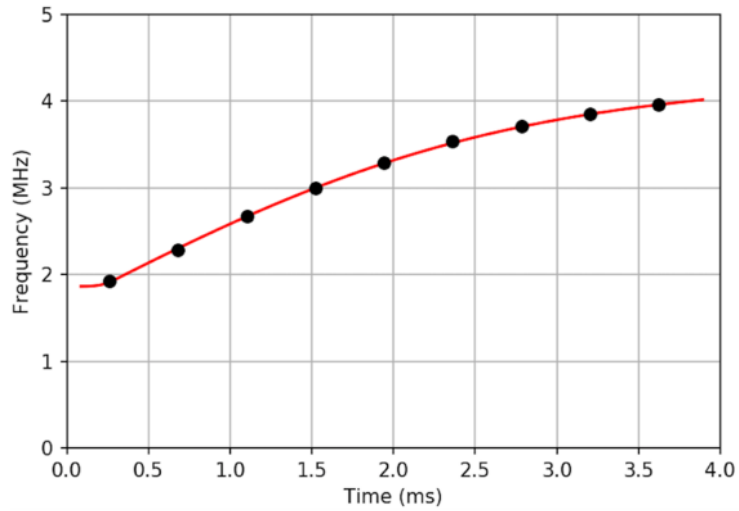


図 3.2-13 試験空洞に機能結合型リングの高周波パターンを入力したときに発生した高周波の周波数。
 黒は高電圧プローブで測定したものをフーリエ解析、赤は意図していた周波数変調パターン。

表 3.2-4 高周波加速装置基本パラメータ

加速電圧振幅	200 V/ring
加速位相	19 – 56 degree
捕獲時間	1.0 ms
総加速時間	4.8 ms
バケツ面積	2.0 eVs

3.3 高繰り返し運転共鳴ビーム取出し装置の研究開発

はじめにベータatron振動の共鳴がどのようにしてビーム取出しに用いることが可能であるかということを、3次共鳴を用いて説明する。一般にベータatron振動の共鳴現象がおこるためには、ベータatronチューン ν が共鳴条件(式 3.3-1)をみたし、リング内に適切な励振力が存在する場合である。3次共鳴の場合は、 ν が 1/3 整数であり、リング内に 6 極磁界が存在する場合である。図 3.3-1 の左上と右上は 6 極マグネットが OFF の状態で、メインマグネットの 4 極成分を調整して水平方向チューンをそれぞれ 3.70 と 3.675 にセットした時の位相空間構造である。6 極マグネットの励磁がない場合、ビームは安定に周回し、位相空間 (x, x') 上では楕円の奇跡を描く。右上の図からわかるように、チューンが $3\nu_x = 11$ の共鳴に近づいても楕円のままである。一方、チューンが $3\nu_x = 11$ の共鳴から離れていても、6 極マグネットを励磁すると、位相空間構造が歪み、楕円からおむすび型に変形する(左下)。ここで、さらにメインマグネットの 4 極成分を調整してチューンを $3\nu_x = 11$ の共鳴に近づけていくと、不安定領域が出現する。安定領域と不安定領域の境界をセパトリクスと呼ぶ。チューンが共鳴条件に近いほど安定領域が小さくなり、セパトリクスの外側のビームは周回ごとと振幅を増大していく(右下)。このため、ビーム中心から遠いほど、ビーム粒子の密度は薄くなり、ビーム中心から十分離れた場所にセプタム等の取出し機器を設置し、ビームの薄皮を削るように取出す方法が共鳴ビーム取出しである。

3.3.1 共鳴ビーム取出しの概念検討【H28】

本研究ではシンクロtronからのビーム取出しにはベータatron振動の共鳴を用いる。通常、水平方向からビームを取出すため、 $2\nu_x = N$, $3\nu_x = N$ (N は整数)といった共鳴が用いられる。前者は半整数共鳴、後者は 3 次共鳴と呼ばれる。本研究項目遂行にあたり、ビームトラッキングコードを整備した。ビーム取出し時の半整数共鳴及び 3 次共鳴が励起された状態での、水平方向位相空間構造を図 3.3-2 及び図 3.3-3 にそれぞれ示す。これらの結果は、上記ビームトラッキングコードを用いたシミュレーションにより得られた。位相空間構造とは、横軸に変異 x 、縦軸に設計軌道に対する傾き x' で張られる位相空間において、加速器中の任意の場所で、ビーム内の粒子について周回ごとに (x, x') をプロットしたもので、ビームの動力的特性を調べる際に有効である。どちらの共鳴の場合でも、安定領域と不安定領域が存在する。ビームの中心近傍は安定にビームが周回するが、ベータatron振動の振幅がある閾値を超えた粒子は共鳴により、周回ごとに振幅が増大し、その結果リングから取り出される。3 次共鳴の場合、安定領域の大きさは、ベータatronチューンと共鳴の距離 δ と、リング内に設置された共鳴励起用の 6 極マグネットの配置とその強さ $k_2 = 1 / 2eB_y''L / p$ によって決まる(ここで e は電荷素量、 B_y'' は磁束密度の垂直成分を中心からの距離 x に関する 2 階微分したもの、 L は 6 極マグネットのビーム軸方向の長さ、 p はビームの運動量である)。6 極マグネットの台数は 4 台で、図 3.2-1 で SX1 及び SX2 と記載された場所に配置した。図 3.3-3 のシミュレーションでは、共鳴からの動作点の距離は $\delta = 0.0033$ とし、6 極マグネットの強度は $k_2 = 0.065 \text{ m}^{-2}$ (最大値)とした。一方半整数共鳴について考察する。8 極マグネットをリング内に設置すると振幅依存のベータatronチューンシフトが生じるので、この 8 極マグネットの励磁電流をビーム取出し制御に用いることが可能である。機能結合型マグネットを使ったラティスでは、チューンを大きく変えることができない。半整数共鳴を取出しに用いた場合、ビーム入射や加速の過程でもチューンが

半整数近傍で運転することで、半整数共鳴を引き起こしやすいため、本研究では 3 次共鳴 $3\nu_x = 11$ をビーム取出しに用いることと決定した。

3.3.2 共鳴励起用多極マグネットの基本設計

(1) 2次元多極磁界成分の確定【H28】

3 次共鳴励起用の 6 極マグネットの基本設計を行った。ここでも、2 次元磁束密度分布の計算には POISSON コードを用いた。6 極マグネットのビーム進行方向の長さは 100 mm とした。所定の 6 極成分を得るためにはコイルに与える起磁力は 1900 アンペアターンとなった。

(2) 多極磁界の 3 次元分布影響の定量化【H29】

3 次共鳴励起用の 6 極マグネットの基本設計を行った。平成 28 年度の 2 次元磁束密度分布の計算に引き続き、平成 29 年度は 3 次元磁束密度分布計算を実施した。これらに基づき、ビーム取出しの検討を行なった。また、これに基づきビーム取出しの検討を行なった。

平成 28 年度はマグネットの機械的な端部の外側では、磁束密度はゼロとし、端部の内側では磁束密度の s 依存性はなく水平及び垂直方向のみの依存性を持つものとした。しかしながら、実際のマグネットでは、磁束密度は s 方向の依存性を持ち、共鳴を用いたビーム取出しでは、この依存性が位相空間構造に影響を与え、その結果、ビーム取出し条件に影響を与える可能性がある。3 次元座標に依存する磁束密度の 3 成分 $B_x(x, y, s)$, $B_y(x, y, s)$, $B_s(x, y, s)$ を計算した。図 3.3-4 に計算に用いた磁極形状を示す。図 3.3-5 に、 s 方向に射影した分布を示す。この図より、端部では磁束の漏れが見られる。端部での多極成分を評価するため、 s 座標の各点における磁束密度を x の多項式

$$B_y(x, 0, s) = a_0(s)x^0 + a_1(s)x^1 + a_2(s)x^2 + a_3(s)x^3 + a_4(s)x^4 + a_5(s)x^5 + a_6(s)x^6 \quad (3.3-1)$$

にフィットした。

表 3.3-1 に代表的な s の座標における規格化された多極磁界成分 $A_i(s) = a_i(s) / a_2(0)$ を示す。 $A_i(s)$ はマグネット中心での 6 極成分が 1 になるように規格化されている。磁極配置の対称性から、奇数次の多極成分はゼロとなる。また、6 極以外の多極成分も十分無視できる程度に小さいことがわかる。

3.3.3 セプタムマグネットの基本設計

ビーム取出しに必要なセプタムマグネットの基本設計を行った。セプタムマグネットとは、周回ビームには作用せず取出しビームにのみ作用する磁界(以下セプタム磁界)を発生させるマグネットである。セプタムコイルはビームロスを少なくする目的から、できる限り薄く作られるが、本研究ではセプタムコイル自体をビーム領域の外に配置し、ビームロスを低減する。

(1) セプタムマグネット基本設計の確立【H30】

ビーム取出し軌道の概略検討を行った。結果を図 3.3-6 に示す。取出しビーム中心軌道を赤線で表す。通常のセプタムマグネットとマスレスセプタムマグネットの組み合わせによってビームを取り出す。マグネットによるビーム偏向角は磁束密度 B と有効磁極長 L の積 BL に比例する。通常セ

プタムマグネットの仕様を $B = 1.5 \text{ T}$, $L = 3 \text{ m}$ とすると、マスレスセプタムの担当分は $BL = 1 \text{ Tm}$ 必要となる。効率的にマスレスセプタムを用いるため、マスレスセプタムを 2 分割した。

図 3.3-7 にマスレスセプタムマグネットの断面形状を示す。急峻な立ち上がりの磁界分布を得るため、コイル配置の最適化・永久磁石による補正等を行っている。計算の結果、磁束密度の立ち上がりは 30 mm 程度であることが判明した。

上記で求められた磁束密度分布を用いて、ビーム取出しのシミュレーションを行った。図 3.3-8 に結果を示す。横軸はビーム軸方向の距離、縦軸は水平方向のビーム粒子の座標である。青線はセプタム磁界のない場合の軌跡、茶色の線はセプタム磁界がある場合の軌跡である。セプタム磁場はわずかではあるが、青線と茶色の線が重ならないのはセプタム磁界がわずかながら周回軌道に影響を与えているためである。茶色の線に示すように、マスレスセプタム通過後は振幅がさらに増加し、通常セプタムのセプタムコイルをかわすことが可能となる。

(2) 取出しビーム特性の定量化【R1】

過年度に実施した検討を元に、ビーム取出しのシミュレーションを実施した。実際のビーム取出し機器の時間的な制御とビームの挙動を模擬し、位相空間上での振る舞いを評価した。ビーム取出し過程で制御する物理量は水平方向チューンである。このため、制御する機器はチューンを補正するための補正用 4 極マグネットである。

チューンが共鳴条件 $3\nu_x = 11$ に近づくと、位相空間上のビームの安定領域が小さくなり、安定領域の外に出る。この共鳴条件の近くでは、安定領域の大きさ S は式 3.3-2 で表される。

$$S = \frac{(\nu_x - m/3)^2}{4\sqrt{3}A_{3m}^2} \quad (3.3-2)$$

ここで、 m は共鳴のハーモニクスでこの場合 11、 A_{3m} は共鳴の強さを表す量で式 3.3-3 で与えられる。

$$A_{3m}e^{ia_{3m}} = \frac{1}{48\pi B\rho} \int_0^C \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} \beta_x^{3/2} e^{i[3(\mu_x - \nu_x s/R) + ms/R]} ds \quad (3.3-3)$$

ここで、 s は軌道に沿った座標、 R は平均軌道半径である。したがって、チューン ν_x が共鳴条件である $11/3$ に近いほど安定領域は小さくなり、また 6 極マグネットが作る 6 極磁界成分 B_y'' が大きいほど安定領域は小さくなる。

安定領域の外側では、ビームはターン毎に振幅が増大し、取出しチャンネルに導入され、リングから取り出される。10 ターン後、40 ターン後、80 ターン後、140 ターン後、600 ターン後、1000 ターン後の位相構造を図 3.3-9 に示す。取出しチャンネルに導入されたビーム粒子は緑点で示した。この計算結果から、取出しチャンネルに導入されたビームのエミッタンスは $30\pi \text{ mm.mrad}$ と十分小さく、取出し効率は 95% であることがわかった。

3.3.4 まとめ

高繰り返しシンクロトロンからのビーム取出しでは、キッカーを用いた速い取出し方式を用いることが一般的であるが、長期連続運転でのビーム安定性の確保とビーム窓熱負荷軽減を目的として、本研究では共鳴ビーム取出し方式の適用可能性を検討した。検討においては、共鳴は

$3\nu_x=11$ を用い、取出し過程でのベータロンチューン調整には補正用 4 極マグネットの励磁量と高周波加速空洞の周波数を採用し、また、取出しセプタムマグネットにはマスレスセプタムマグネットを採用した。検討の結果、高繰り返しシンクロトロンに対して、高繰り返し運転共鳴ビーム取出しを適用できることを理論的に明らかにした。

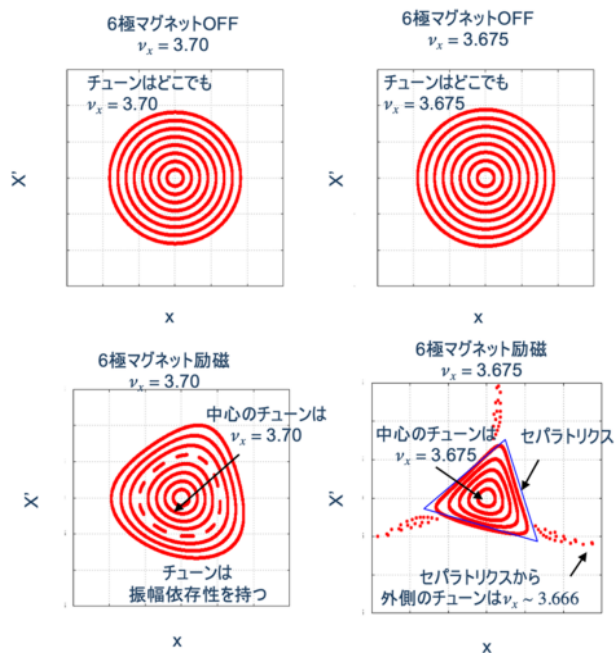


図 3.3-1 ベータロン振動の共鳴を用いたビーム取出しの概念図。

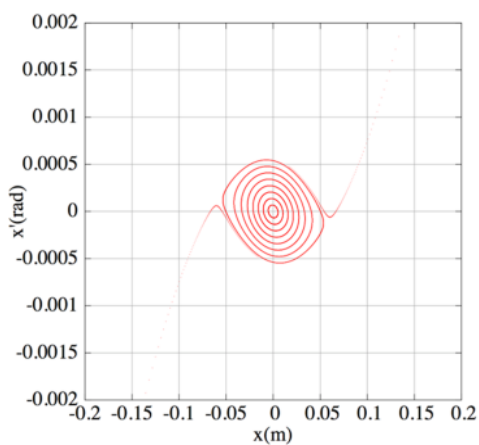


図 3.3-2 半整数共鳴励起時の水平方向位相空間構造。

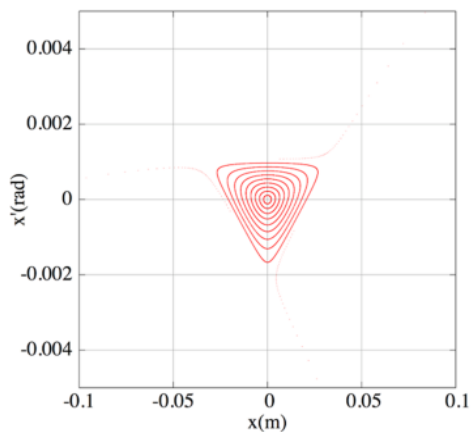


図 3.3-3 3 次共鳴励起時の水平方向位相空間構造。

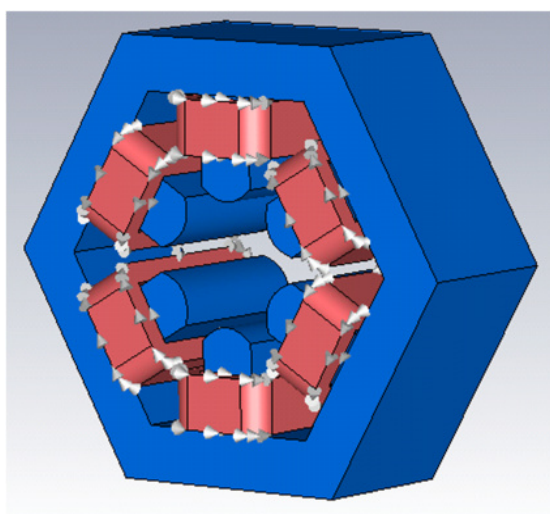


図 3.3-4 マグネット端部磁界影響の計算体系の評価に用いた 6 極マグネットの 3 次元モデル。図中青色が鉄磁極、赤色がコイルを示しており、コイル表面の矢印は電流の方向を示している。

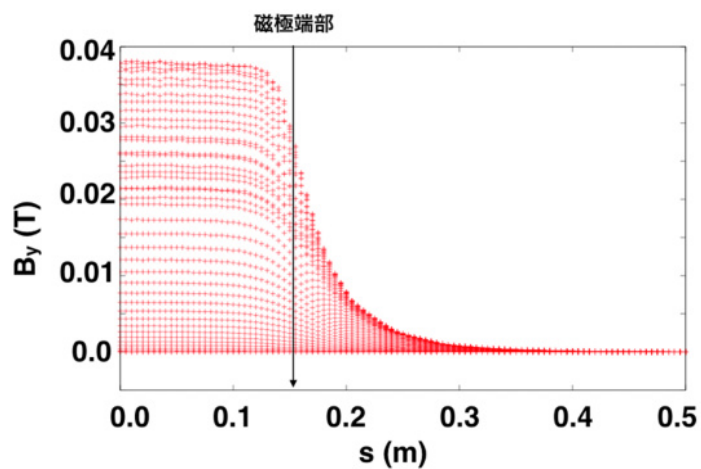


図 3.3-5 6 極マグネットの磁束密度分布の s 方向への射影。磁極端部は $s = 150 \text{ mm}$ である。磁極端部より外側への磁束の漏洩が認められる。

表 3.3-1 6 極マグネットの多極磁界成分

$s(\text{mm})$	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	0.000	0.000	1.000	0.000	0.536E-6	0.000	-0.637E-10
100	0.000	0.000	0.942	0.000	0.636E-5	0.000	-0.257E-9
150	0.000	0.000	0.715	0.000	0.417E-5	0.000	0.809E-10
170	0.000	0.000	0.553	0.000	0.218E-5	0.000	-0.428E-9
180	0.000	0.000	0.479	0.000	-0.288E-5	0.000	-0.245E-9
200	0.000	0.000	0.333	0.000	-0.591E-5	0.000	-0.108E-9
300	0.000	0.000	0.363E-1	0.000	-0.107E-5	0.000	0.445E-11

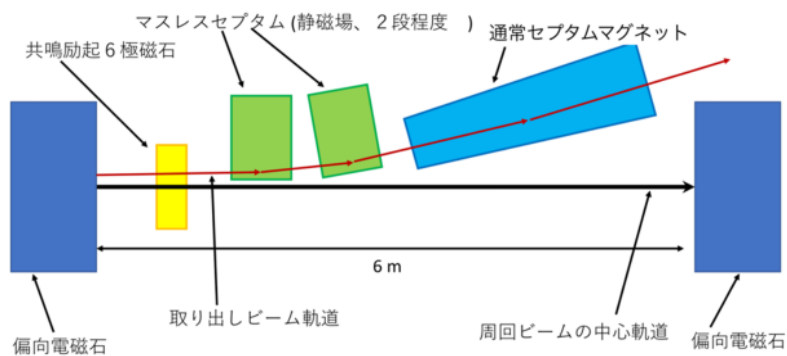


図 3.3-6 ビーム取出し軌道。取出しビーム中心軌道を赤線で表す。通常のセパタムマグネットとマスレスセパタムマグネットの組み合わせによってビームを取り出す。マグネットによるビーム偏向角は磁束密度 $B(\text{T})$ と有効磁極長 $L(\text{m})$ の積 BL に比例する。通常セパタムマグネットの仕様を $B = 1.5 \text{ T}$, $L = 3 \text{ m}$ とすると、マスレスセパタムの担当分は $BL = 1 \text{ Tm}$ 必要となる。効率的にマスレスセパタムを用いるため、マスレスセパタムを2分割した。

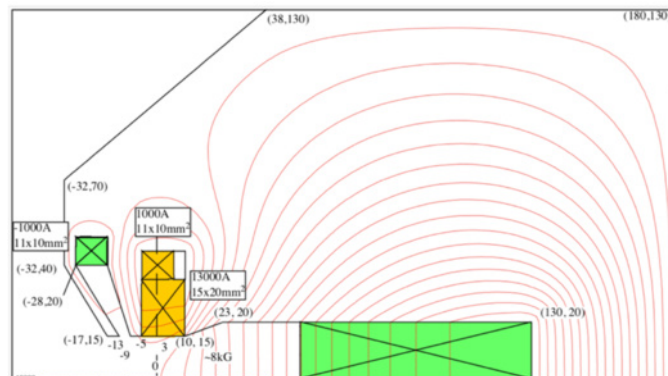


図 3.3-7 マスレスセパタムマグネット断面図。急峻な立ち上がりの磁界分布を得るため、コイル配置の最適化・永久磁石による補正等を行う。

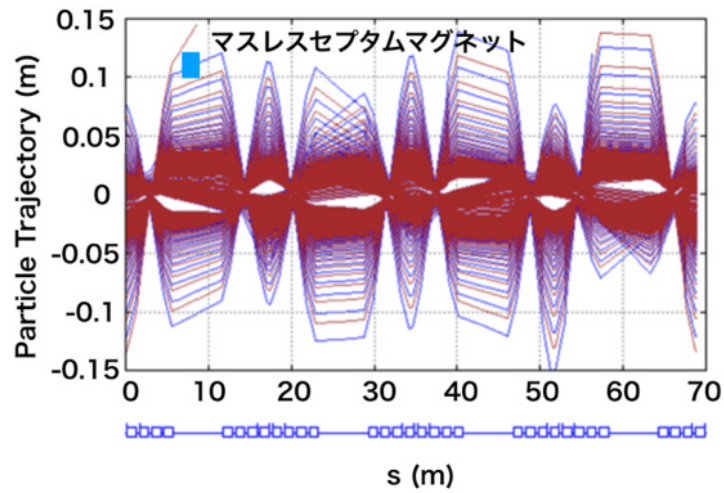


図 3.3-8 セパトリクスの外に出た粒子の軌跡。横軸はビーム軸方向の距離、縦軸は水平方向のビーム粒子の座標である。青線はセプタム磁界のない場合(図 3.3-6)の軌跡、茶色の線はセプタム磁界のある場合(図 3.3-7)の場合の軌跡である。

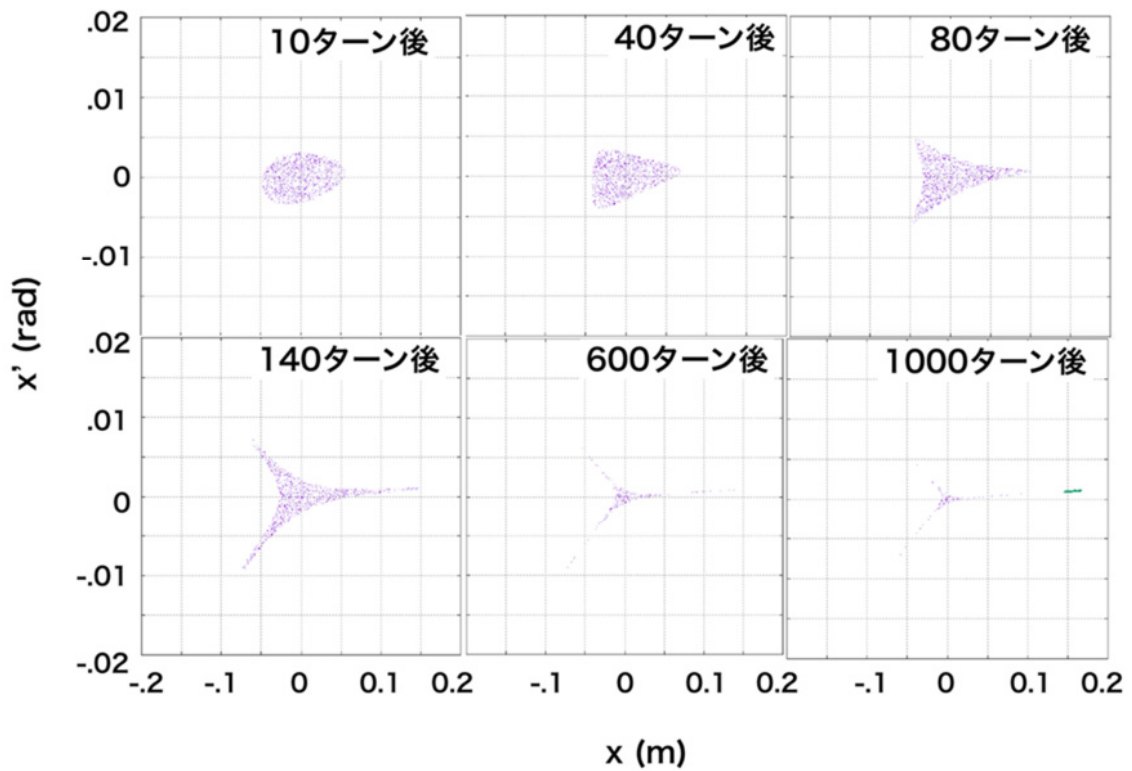


図 3.3-9 取出し過程での位相空間構造。

3.4 研究推進

3.4.1 チーム会議による研究進捗管理と研究推進【H28-R1】

平成 28 年度から平成 30 年度は各年度 6 回、令和元年度は 8 回、工学研究科、複合原子力科学研究所のメンバーが集まりチーム会議を開催し、研究代表者による研究推進管理とチーム内で連携した研究推進を行った。また、目的の達成度について、中間的な取りまとめを行った。以上のように、各業務項目間の連携による研究推進を達成した。

また、国際会議にて 19 件(うち招待講演 5 件)、国内学会等にて 8 件(うち招待講演 1 件)の成果発表を行った他、学術雑誌にて論文が 6 件公刊された。

[成果発表一覧]

(1) 国内学会等における口頭・ポスター発表

- 1) 不破康裕, 栗山靖敏, 上杉智教, 石禎浩, 雨宮尚之, “加速器駆動核変換システムのための高繰り返しシンクロトロン設計”, 第 14 回日本加速器学会 WEP023, 公演概要集 p. 863 (2017 年 8 月 2 日、北海道札幌市) (ポスター発表) (国内学会)
- 2) 不破康裕, 栗山靖敏, 上杉智教, 石禎浩, “高繰り返しシンクロトロンを用いたマルチ MW 陽子加速器の設計”, 日本物理学会第 73 回年次大会 22aK607-8 (2018 年 3 月 22 日、千葉県野田市) (口頭発表) (国内学会)
- 3) 曾我部友輔, 安永将広, 富永直樹, 雨宮尚之, “スーパーフェリックマグネットを構成する高温超伝導コイルの三次元電磁界解析による交流損失評価手法”, 第 96 回 2018 年度春季低温工学・超電導学会 2A-p04, 講演概要集 p. 92 (2018 年 5 月 28 日、東京都江戸川区) (口頭発表) (国内学会)
- 4) 不破康裕, 栗山靖敏, 上杉智教, 石禎浩, 雨宮尚之, “加速器駆動核変換システムのための高繰り返しシンクロトロン”, 第 15 回日本加速器学会、プロシーディングス p. 316 - 318, (2018 年 8 月 8 日、新潟県長岡市) (ポスター発表) (国内学会)
- 5) 李陽, 曾我部友輔, 雨宮尚之, 姜哲男, シドロフゲナーディー, “鉄芯を挿入した高温超伝導コイルスタックの交流損失測定”, 第 97 回 2018 年度秋季低温工学・超電導学会 1P-p22, 講演概要集 p. 83 (2018 年 11 月 9 日、山形県山形市) (ポスター発表) (国内学会)
- 6) 曾我部友輔, 安永将広, 不破康裕, 石禎浩, 雨宮尚之, “スーパーフェリックマグネットを構成する高温超伝導コイルの交流損失特性のマグネット形状依存性,” 第 98 回 2019 年度春季低温工学・超電導学会 2C-p04, 講演概要集 p. 99 (2019 年 5 月 29 日、茨城県つくば市) (口頭発表) (国内学会)
- 7) 李陽, 雨宮尚之, 吉田良行, 町敬人, “スパイラル状に巻いた多芯薄膜高温超伝導線材の結合時定数測定,” 第 98 回 2019 年度春季低温工学・超電導学会 2C-p04, 講演概要集 p. 99 (2019 年 5 月 30 日、茨城県つくば市) (口頭発表) (国内学会)
- 8) 雨宮尚之, “高温超電導線材に対する期待,” 電力・エネルギーフォーラムおよび超電導機器研究会/第3回超電導応用研究会シンポジウム「超電導化に向かう円形加速器」(2019 年 8 月 27 日、千葉県千葉市) (招待講演・口頭発表) (国内シンポジウム)

(2) 国際会議における口頭・ポスター発表

- 1) Y. Sogabe, Z. Jiang, S. Wimbush, N. Strickland, M. Staines, N. Long, and N. Amemiya, “Comparison between AC loss measurements and analyses in coil assemblies with different geometries and conductors”, 25th International Conference on Magnet Technology (MT-25), Wed-Af-Po3.12/519 (2017年8月30日、Amsterdam, The Netherlands) (ポスター発表)
- 2) Y. Fuwa, Y. Iwashita, A. Kondo, M. Sagawa, “Cryogenic hybrid magnet with praseodymium permanent magnet”, 25th International Conference on Magnet Technology (MT-25), Wed-Af-Po3.10-19 (2017年8月30日、Amsterdam, The Netherlands) (ポスター発表)
- 3) Y. Li, Y. Sogabe, T. Kikuchi, and N. Amemiya, “Influence of E-J characteristics of coated conductors and field ramp-up rates on the shielding-current-induced fields of magnets”, 25th International Conference on Magnet Technology (MT-25), Thu-Af-Po4.10/646 (2017年8月31日、Amsterdam, The Netherlands) (ポスター発表)
- 4) Y. Fuwa, Y. Kuriyama, T. Uesugi, Y. Ishi, “Conceptual Design of Proton Drivers for Accelerator Driven System”, 2017 International Workshop on FFAG Accelerators (FFAG" 17), (2017年9月10日、Ithaca, U.S.A.) (口頭発表)
- 5) Y. Sogabe, M. Yasunaga, N. Tominaga, E. Kawanishi, and N. Amemiya, “Three-dimensional electromagnetic field analysis model for ac loss calculations of HTS coils in superferic magnets”, CHATS on Applied Superconductivity 2017 (2017年12月12日、Sendai, Japan) (口頭発表)
- 6) N. Amemiya, M. Yasunaga, and Y. Sogabe, “Electromagnetic field analyses of HTS superferic magnets for rapid cycling synchrotrons”, 6th International conference on superconductivity and magnetism (ICSM 2018), Abstract ID:3544 (2018年4月30日、Antalya, Turkey) (招待講演・口頭発表)
- 7) Y. Fuwa, K. Kuriyama, T. Uesugi, and Y. Ishi, “Design of multi-mw rapid cycling synchrotron for accelerator driven transmutation system”, 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC'18), (2018年4月30日、Vancouver, Canada) (ポスター発表)
- 8) N. Amemiya, N. Tominaga, T. Mifune, Y. Sogabe, Y. Mizobata, M. Yasunaga, A. Ida, and T. Iwashita, “Progress of large-scale and fast electromagnetic field analyses of coils wound with coated conductors for ac loss and shielding current calculations”, 6th International Workshop on Numerical Modelling of HTS (HTS 2018 Modelling), O-22 (2018年6月28日、Caparica, Portugal) (招待講演・口頭発表)
- 9) Y. Fuwa, Y. Kuriyama, T. Uesugi, Y. Ishi, “Conceptual design of proton drivers for accelerator driven system”, 2018 International Workshop on FFAG Accelerators, (2018年9月13日、Kyoto, Japan) (口頭発表)
- 10) Y. Sogabe, M. Yasunaga, Y. Fuwa, Y. Kuriyama, T. Uesugi, Y. Ishi, and N. Amemiya, “AC loss characteristics of superferic magnets using HTS coils for rapid cycling

- synchrotrons with different magnet geometry”, 2018 Applied Superconductivity Conference (ASC 2018), 1LPo2B-03 (2018年10月29日、Seattle, U.S.A.) (ポスター発表)
- 11) N. Amemiya, X. Luo, and S. Inoue, “Study on conditions for successful quench protections of coils wound with coated conductors by short-sample experiments and quench simulations,” CHATS on Applied Superconductivity 2019, ID 31 (2019年7月11日、Szczecin, Poland) (口頭発表)
 - 12) N. Amemiya, Y. Sogabe, Y. Li, and M. Yasunaga, “Comparison between measured and calculated ac losses in a CORC wire,” The 2019 Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, M2Po2D-05 (2019年7月23日、Hartford, U.S.A.) (口頭発表)
 - 13) X. Luo, S. Inoue, and N. Amemiya, “Relevance of current density in copper stabilizer for quench protection of coated conductors,” 26th International Conference on Magnet Technology (MT-26), Tue-Mo-Po2.10-03 (2019年9月24日、Vancouver, Canada) (ポスター発表)
 - 14) Y. Li, Y. Sogabe, M. Yasunaga, Y. Fuwa, Y. Ishi, and N. Amemiya, “Reduction of ac loss in HTS coils of superferric magnets for rapid cycling synchrotrons by changing iron yoke geometry,” 26th International Conference on Magnet Technology (MT-26), Tue-Af-Po2.19-12 (2019年9月24日、Vancouver, Canada) (ポスター発表)
 - 15) Y. Sogabe, M. Yasunaga, and N. Amemiya, “A simplified electromagnetic modelling of accelerator magnets wound with conductor on round core wires for ac loss calculations,” 26th International Conference on Magnet Technology (MT-26), Thu-Mo-Po4.07-04 (2019年9月26日、Vancouver, Canada) (ポスター発表)
 - 16) N. Amemiya and Y. Sogabe, “Applications of HTS magnets to particle accelerators,” The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (ITC 28), I2-02 (2019年11月6日、Toki, Japan) (招待講演・口頭発表)
 - 17) M. Yasunaga, Y. Li, Y. Sogabe, Y. Fuwa, Y. Ishi, and N. Amemiya, “AC loss calculations of superferric magnets using HTS coils wound with stacked coated conductors and wound with CORC® wires,” 32nd International Symposium on Superconductivity (ISS 2019), APP1-5 (2019年12月3日、Kyoto, Japan) (ポスター発表)
 - 18) N. Amemiya, Y. Sogabe, M. Yasunaga, Y. Li, Y. Ishi, and Y. Fuwa, “HTS magnets for rapid-cycling synchrotrons for accelerator-driven transmutation systems,” 10th Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics (ACASC), 2nd International Cryogenic Materials Conference in Asia (Asian ICMC), 7A1-1 (2020年1月7日、Okinawa, Japan) (招待講演・口頭発表)
 - 19) Y. Ishi, Y. Fuwa, K. Suga, H. Okita, Y. Kuriyama, T. Uesugi, Y. Mori, “Recent experimental results of the accelerator driven system with a sub-critical nuclear reactor(ADS) program”, 22nd International Conference on Cyclotrons and their Applications (CYC 2019), MOA01 (2019年9月23日、Cape Town, Republic of South

Africa) (招待講演・口頭発表)

(3) 学会誌・雑誌等における論文掲載

- 1) Y. Li, N. Tominaga, Y. Sogabe, T. Kikuchi, S. Wimbush, S. Granville, and N. Amemiya, “Influence of E-J characteristics of coated conductors and field ramp-up rates on shielding-current-induced fields of magnet”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 28, No. 3, Art. No. 4601105, DOI: 10.1109/TASC.2017.2785817 (April, 2018)
- 2) Y. Sogabe, Z. Jiang, S. C. Wimbush, N. M. Strickland, M. Staines, N. J. Long, and N. Amemiya, “AC loss characteristics in REBCO coil assemblies with different geometries and conductors”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 28, No. 3, Art. No. 4700105, DOI: 10.1109/TASC.2017.2783368 (April, 2018)
- 3) Y. Sogabe, M. Yasunaga, Y. Fuwa, Y. Kuriyama, T. Uesugi, Y. Ishi, and N. Amemiya, “AC losses in HTS coils of superferic dipole and combined-function magnets for rapid-cycling synchrotrons,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 29, No. 5, Art. No. 5900505, DOI: 10.1109/TASC.2019.2895861 (August, 2019)
- 4) T. Mifune, N. Tominaga, Y. Sogabe, Y. Mizobata, M. Yasunaga, A. Ida, T. Iwashita, and N. Amemiya, “Large-scale electromagnetic field analyses of coils wound with coated conductors using a current-vector-potential formulation with a thin-strip approximation,” *Superconductor Science and Technology*, Vol. 32, No. 9, Art. No. 094002, DOI: 10.1088/1361-6668/ab1d35 (September, 2019)
- 5) Y. Li, Y. Sogabe, M. Yasunaga, Y. Fuwa, Y. Ishi, and N. Amemiya, “Reduction of losses in superferic magnets for rapid cycling synchrotrons by changing cross-section size of coils and iron yoke geometry,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 30, No. 4, Art. No. 4700905, DOI: 10.1109/TASC.2020.2969392 (June, 2020)
- 6) Y. Sogabe, M. Yasunaga, and N. Amemiya, “Simplified electromagnetic modelling of accelerator magnets wound with Conductor on Round Core wires for ac loss calculations,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 30, No. 4, Art. No. 4004005, DOI: 10.1109/TASC.2020.2981442 (June, 2020)

4. 結言

4.1 成果のまとめ

本研究開発では、交流高温超伝導マグネットと共鳴ビーム取出しを応用することにより、マグネットの交流運転が必要で超伝導化によるマグネット消費電力低減が困難であり、長期連続運転で安定したビーム取出しが困難であるという、高繰り返しシンクロトロン欠点を克服できることを明らかにし、図 4.1-1 に概念図を、表 4.1-1 に諸元を示すような ADS 用高繰り返しシンクロトロンの概念設計を提示することに成功した。

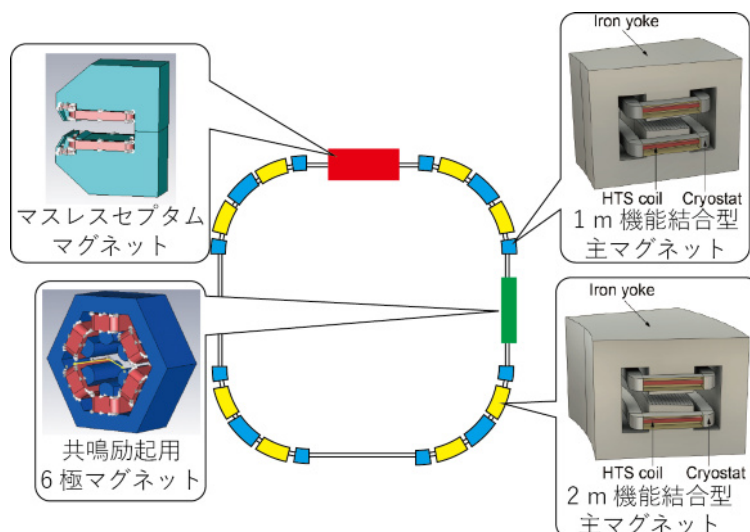


図 4.1-1 設計された加速器及び加速器を構成する要素

表 4.1-1 設計された加速器の諸元

粒子	陽子	周長	68.9 m
ビームエネルギー	1.5 GeV	設置面積	20 m × 20 m
ビーム電流	1 mA	マグネット消費電力	0.5 MW
ビームパワー	1.5 MW	高周波加速装置消費電力	3.6 MW
繰り返し周波数	100 Hz	加速器消費電力	4.1 MW

4.2 目標達成度・成果の新規性・研究の効果

本研究では、ADS の実用化に向けて、従来検討されてきた線形加速器に代わる、小型・低消費電力で、安定した陽子ビームを原子炉に供給できる革新的円形加速器として、高繰り返しシンクロトロンのフィージビリティを提示した。交流高温超伝導マグネットと共鳴ビーム取出しを応用し、ビームパワー1.5MW(ビームエネルギー1.5GeV、ビーム電流 1mA)、消費電力 4.1MW という目標値を上回る ADS 用高繰り返しシンクロトロンの概念設計に成功した。したがって、目標達成度は 100%である。

交流高温超伝導マグネットと共鳴ビーム取出しという、従来検討されてこなかった技術を用いることによって、高繰り返しシンクロトロンの欠点を克服し、設置面積が大きく安定な陽子ビーム供給が難しい線形

加速器を置き換える見通しを立てたという点において、成果の新規性は高い。

小型・低消費電力で、安定した陽子ビームを原子炉に供給できる ADS 用革新的円形加速器のフィージビリティを示したことが本研究の直接の効果である。長期的には、ビームパワー1.5 MW の高繰り返しシンクロトロンを用いた原子炉熱出力 40 MW の ADS を実現できれば年間 2 kg、ビームパワー30 MW の高繰り返しシンクロトロンを用いた原子炉熱出力 800 MW の ADS を実現できれば年間 40 kg のマイナーアクチノイドの核変換処理による放射性廃棄物減容・有害度低減の効果が期待できる。

4.3 今後の展開・将来の見通し

本研究開発では、交流高温超伝導マグネットと共鳴ビーム取出しを応用した ADS 用高繰り返しシンクロトロンのフィージビリティを示した。

交流高温超伝導マグネットに関しては、要素となる高温超伝導線の技術は実用域に達しつつあるので、これを用いた集合導体によって高温超伝導コイルを構成することは理論上、可能である。この高温超伝導コイルをクライオスタットと呼ばれる液体窒素を貯める低温容器に収納し、鉄ヨークと組合せた、交流高温超伝導マグネットのプロトタイプ製作と試験を通じた技術実証が次の段階の研究開発として期待される。

高繰り返し運転共鳴ビーム取出しに関しては、加速器において実証実験を行い、ビームパルス時間構造に関するデータを取得し、ビーム窓開発の基礎データを提供することが次の段階の研究開発として期待される。

また、上述のような超伝導マグネット技術、加速器技術に加えて、高繰り返しシンクロトロンとの適合性の観点に焦点を絞った加速器駆動核変換システムの原子炉技術の検討も次の段階の研究開発においては必須であると考えている。

本研究開発と並行して、京都大学、日本原子力研究開発機構、物質・材料研究機構の研究者で、2017年2月から21回にわたり(2020年3月時点)、「ADS・円形加速器・超伝導に関する勉強会」を開催し、上述したような、原子炉技術、加速器技術、超伝導技術に関する情報交換と研究開発課題の抽出を進めてきた。同勉強会でまとめた高繰り返しシンクロトロンを用いた ADS 開発のロードマップを図 4.3-1 に示す。また、プロトタイプ C-ADS の諸元を表 4.3-1 にまとめる。ただし、3章まではビームパワー1.5 MW に対し原子炉熱出力 40 MW となる原子炉設計を採用していたが、この表では上述の勉強会での議論を踏まえ、ビームパワー10 MW に対して原子炉熱出力 400 MW となる原子炉設計を採用している。本研究開発の成果、同勉強会の成果を踏まえて、原子炉技術の研究者、加速器技術の研究者、超伝導技術の研究者が協力し、次の段階の研究開発に進むことが期待される。

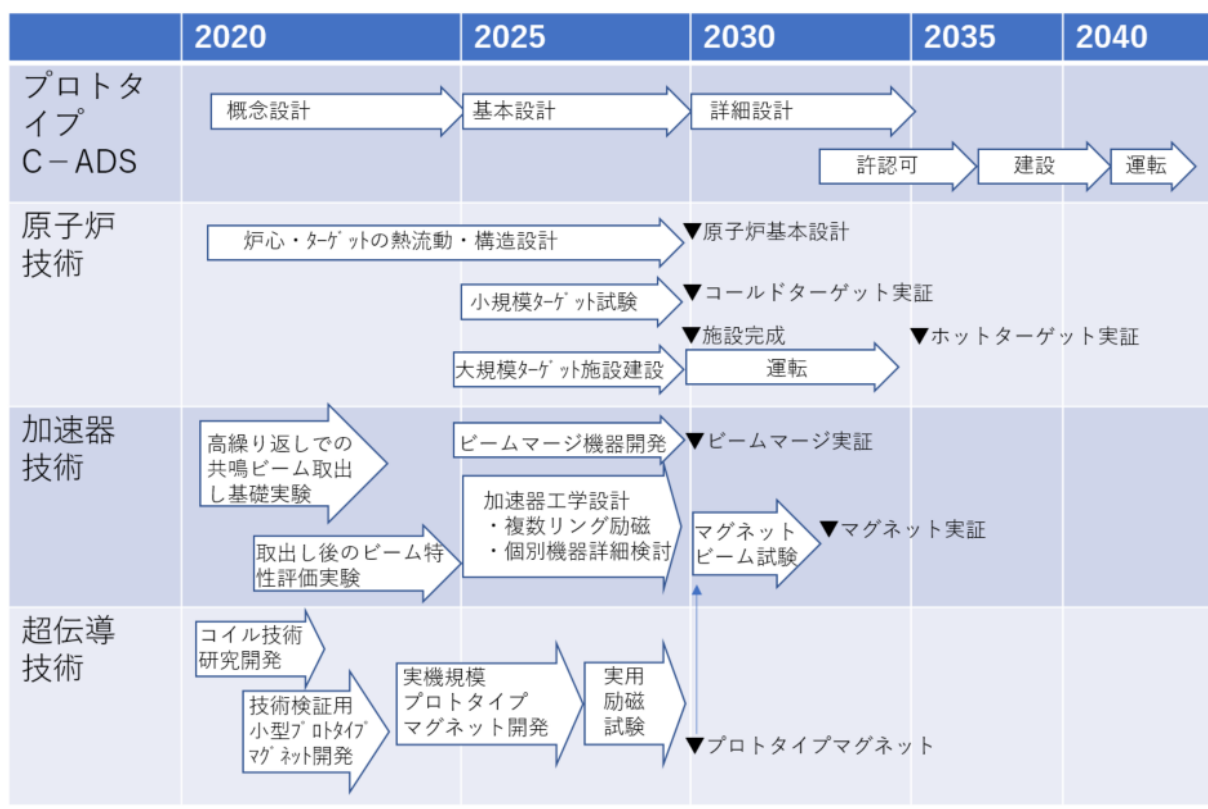


図 4.3-1 高繰り返しシンクロトロンを用いた ADS 開発のロードマップ(京都大学、日本原子力研究開発機構、物質・材料研究機構)

表 4.3-1 プロトタイプ C-ADS の諸元

熱出力	200~400 MW
ビームパワー*	5~10 MW
ビームエネルギー	1.5 GeV
ビーム電流	3.3~6.7 mA

* ビームパワー10 MW に対して原子炉熱出力 400 MW となる原子炉設計を採用

用語一覧

用語	説明
<p>加速器駆動核変換システム</p>	<p>加速器駆動核変換システム(以下 ADS: Accelerator Driven System)は、加速器と原子炉を組み合わせたハイブリッドシステムです。加速器によって生成した高エネルギー陽子を鉛ビスマス等のターゲットに照射し核破砕反応を起こし、核破砕反応によって発生した高エネルギー中性子を未臨界炉心において核分裂反応により増倍させます。炉心にマイナーアクチノイド(MA)を含んだ燃料を装荷しておくことにより、高エネルギー中性子により MA の長寿命核を安定核や短寿命核に変換できます。このように、ADS を用いれば、軽水炉使用済燃料中の長寿命の MA を安定核や短寿命核に変換し、潜在的毒性の減衰時間を一万年から数百年に短縮できます。つまり、使用済燃料の処分に ADS は大きく寄与し得るシステムであるといえます。</p>
<p>線形加速器</p>	<p>荷電粒子を電界で加速する高周波加速装置を直線状に配置した加速器です。高周波加速装置の空洞共振器に超伝導を用いると連続ビームが得られ、ビーム電流が大きくなるという長所がある一方、粒子がひとつの高周波加速装置を1度しか通過しないため、高エネルギーまで粒子を加速するためには、高周波加速装置の台数を増やさねばならず、加速器全体の設置面積が大きくなるという欠点もあります。また、高周波加速装置が1台故障すると、ビームが停止するため、ビーム停止の頻度が高くなるという課題もあります。</p>
<p>円形加速器</p>	<p>円形または円形に近い閉じたビーム軌道を持つ加速器です。ビーム軌道に垂直な磁界(2極磁界成分)によるローレンツ力で粒子の進行方向を偏向させビーム軌道を円形にします。ひとつの高周波加速装置に荷電粒子を何度も通過させて加速することが可能であるため、加速器全体の設置面積と高周波加速装置の台数を低減することが可能です。さらに、複数の高周波加速装置が設置された円形加速器であれば、1台が故障しても、残りで補えるという長所もあります。一方、ビームを円軌道に沿って安定に周回させるために、多数のマグネット(電磁石)が必要となり、マグネットの消費電力が加速器の効率を低下させてしまいます。</p>
<p>シンクロトロン</p>	<p>円形加速器のひとつの方式です。円形加速器においてビームを偏向させる2極磁界成分が一定であったとすると、粒子が加速されエネルギーが大きくなるにつれて、円軌道の半径は大きくなってしまいます。粒子の加速につれて2極磁界成分を大きくしていき、ビーム軌道の半径を一定に保つ円形加速器がシンクロトロンです。比較的小型の2極マグネットで構成でき、高エネルギーまで加速可能であるという利点があります。一般にビームを安定に周回させるために4極マグネット等も使用されます(多極磁界成分については別に説明)。種となる低エネルギーの粒子を入射し、これを加速し(その際、2極マグネットの発生磁界は大きくしていき)、加速された粒子を取出すというサイクルを繰り返します。このように、本質的に繰り返し運転の加速器であるため、ビーム電流を大きくしにくいという欠点もあります。</p>

高繰り返しシンクロトロン	ビーム電流を上げることを目的として、「入射」、「加速」、「取出し」からなる一連の運転サイクルの単位時間当たりの繰り返し回数を上げたシンクロトロンです。数 10 Hz 以上の繰り返し運転が可能なシンクロトロンがこれに当たります。1 サイクル当たりの粒子数を増やさなくても平均ビーム電流を上げることができるため、安定した大電流のビーム供給が可能です。つまり、大きなビーム電流は得にくいというシンクロトロン欠点を、繰り返しの周期を短くすることにより克服するものです。英語では Rapid Cycling Synchrotron (RCS) と呼ばれます。
固定磁界強集束加速器 (FFAG 加速器)	FFAG=Fixed Field Alternating Gradient とは、加速器のビーム収束方式のひとつで、固定磁界かつ交互勾配を実現するマグネット配置を用いるものです。この方式を用いた円形加速器を単に FFAG と呼ぶ場合もあります。固定磁界は磁界が時間的に変化せず一定の値で励磁されることを指し、これによって運転繰り返しを高く設定することができ、高いビーム電流を実現できます。一方、交互勾配は収束磁界と発散磁界が交互に配置されることを指し、これによって強い収束力が得られ、高いエネルギーまでのビーム加速が可能となります。すなわち、高いエネルギーかつ大強度ビームを発生することが可能な収束方式といえます。
周長 周長と高周波加速装置の消費電力	周長とは円形加速器を粒子が 1 周する長さです。円形加速器の周長が半分になると、単位時間当たりに粒子が高周波加速装置を通過する回数が 2 倍になり、加速電圧(電界と加速距離の積)が半分で済むことから、高周波加速装置の数を半減させることができ、その結果、高周波加速装置での消費電力を減らすことができます。
ビーム光学設計	ビームを安定に偏向・集束させるための装置(主に 2 極及び 4 極マグネット)の磁界強度や磁界勾配及びその配置に関する設計を指します。
ビーム安定性	ビームが安定に円形加速器内を周回し、加速されることを指します。安定性を阻害する要因としては、ベータatron振動の共鳴や空間電荷効果、またビームが真空ダクト・高周波加速装置・ビームモニタといった機器と相互作用することで生じる電界といったものが挙げられます。
ラティス	シンクロトロン等のリングやビーム輸送系では、2 極マグネットや 4 極マグネット等により、ビームを設計軌道に合わせて偏向させたり収束させたりしながら、ビームは安定に保たれます。その際、それらのマグネットの磁束密度を適正な値に設定し、適切に配置する必要があります。このマグネットの配置をラティスと呼びます。
4 極マグネット、QF, QD	4 極マグネットとは 4 つの磁極から構成されるマグネットのことで、加速器ではビームを収束する用途に用いられます。静磁界の特性のため、水平方向の収束と垂直方向の収束は両立せず、水平方向でビームを収束させる磁極配置であれば、垂直方向ではビームを発散させる働きをします。このような磁極配置を持つマグネットを QF (quadrupole focusing) と呼びます。逆に垂直方向でビームを収束させる磁極配置では、水平方向ではビームを発散させる働きをし、この磁極配置を持つマグネットを QD (quadrupole defocusing) と呼びます。このように、収束(F)あるいは発散(D)という言葉は水平方向を基準として定義されています。
8 極マグネット	磁極の数が 8 個から構成されるマグネットです。マグネット中心平面での磁束密度分布は、マグネット中心からの距離 x の 3 次関数となります。この 8 極マグネットによる非線形磁界は、振幅に依存したベータatronチューンの変化(チューンシフト)を生み出します。
機能結合型メインマグネット	シンクロトロンのメインマグネットとして、1 台で偏向と集束の機能を併せ持つマグネットです。2 極磁界と 4 極磁界を重ね合わせた磁界分布を生成します。

機能結合型マグネットを使ったラティス・加速器	上記機能結合型メインマグネットを用いて構成されるラティス・加速器です。2 極、4 極マグネットを別途設置する必要がなく周長を短くできること、電源が 1 種類で済むこと等の利点がある一方、ベータロンチューンの可変領域が狭く、運転パラメータの自由度が少ないことが弱点です。
機能分離型メインマグネット	ビームに対する偏向・集束(発散)等の作用を及ぼす特定の機能に特化したマグネットです。偏向作用には一様な磁界が必要であるため 2 極マグネット、収束(発散)には一様な磁界勾配が必要であるため 4 極マグネットが用いられます。
機能分離型マグネットを使ったラティス・加速器	上記機能分離型メインマグネットを用いて構成されるラティス・加速器です。偏向・集束(発散)の作用ごとに独立にマグネットを配置するため、機能結合型マグネットを使ったラティス・加速器に比べ、周長が長くなり、またマグネットの種類に応じて独立に電源が必要となり、運転に際しては同期を取りながら励磁していくことが必要となります。一方、ベータロンチューンの可変範囲が広く取れるという利点があります。
多極磁界成分	マグネット中の磁界分布は、ビーム軸近傍で 2 極、4 極、6 極、...といった多極マグネットが作る磁界の重ね合わせとして表現することができ、多極磁界成分とはそれぞれの成分を指します。2 極磁界成分はビームを偏向させる機能を持ち、4 極磁界成分は、ビームを集束・発散させる機能を持ちます。共鳴取出しでは 6 極(あるいは 8 極)磁界成分を用いて共鳴条件を作り出すため、この多極磁界成分を持つマグネットが必要となります。
ベータロン振動 ベータロンチューン	円形加速器中のビームは、閉じた軌道(閉軌道)の周りを微小振動しながら周回しています。この振動をベータロン振動と呼びます。ベータロンチューンとは、リング 1 周当たりに何回ベータロン振動を行うか、すなわち、周回当たりの振動の波数のことを指し、一次近似では加速器の磁界分布で決まります。共鳴を避けるため、ベータロンチューンには半端な数が選ばれます。
ベータ関数	ビームはラティス(マグネット配置)上をベータロン振動しながら進行します。ベータロン振動の振幅は場所によって異なり、マグネット配置と磁束密度分布に依存します。このビームの包絡線はビーム軸上の距離 s の関数 $\beta(s)$ とエミッタンス ϵ を用いて $(\beta(s)\epsilon/\pi)^{1/2}$ と表されます。すなわち、ベータ関数 $\beta(s)$ はエミッタンスで規格化されたビーム振幅の 2 乗に相当します。ラティスがリングを形成する場合、周期的境界条件を課すことにより、ベータ関数もラティスと同じ対称性を持ちます。
分散関数	運動量が設計値 p に対し dp だけ異なる粒子が 2 極マグネットを通過する際、設計軌道よりも大きな曲率半径を持つため、設計軌道に対して変異が生じます。ビーム軸に沿ってこの変異 dx を運動量の変化率で規格化した関数を分散関数 $\eta(s)$ と呼びます。したがって、運動量のズレに起因するビーム中心軌道のズレは $dx(s) = \eta(s)dp/p$ となります。ラティスがリングを形成する場合、周期的境界条件を課すことにより、分散関数 $\eta(s)$ もラティスと同じ対称性を持ちます。
エミッタンス	エミッタンス ϵ はビームの広がりを表す量で、ビームの進行方向に対して垂直な方向の変異を横軸に、設計軌道に対する傾きを縦軸にとった二次元の位相空間における面積として定義されます。エミッタンスは収束系によらずビーム固有の広がりを表す量であるため、ラティス上のどこで見ても同じ値を取ります。
高周波加速 シンクロトロン加速	粒子集団が高周波加速装置の周波数に追従して特定のエネルギーに収束される(位相安定性の原理)ことを利用し、周波数を徐々に変化させることによってビームを加速する方法です。周波数の変化を速くすればより速く加速されますが、位相空間の安定領域(高周波バケツ)は狭くなりビームが失われやすくなります。

高周波加速装置	ビームを加速するための電界を発生させる装置です。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します。超相対論的エネルギー(速度がほぼ光速)に満たないエネルギーの陽子シンクロトロンでは、加速の際、周波数をビームエネルギーに応じて変化させます。
位相安定性の原理	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(→注:スリッページ)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とで運動量に偏りが生じます。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(スリッページ)を補正するように働きます。これが位相安定性の原理です。 この原理に基づいて粒子が縦方向位相空間で行う非線形振動をシンクロトロン振動と呼び、シンクロトロン振動の安定領域を高周波バケツと呼びます。
同期運動量 同期エネルギー 同期位相	印加する高周波加速装置の周波数に対応する運動量(図 3.2-7)を同期運動量、そのエネルギーを同期エネルギーと呼びます。一周当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りますが、そのエネルギーは高周波電圧から供給されます。 $dE=qV\sin\phi_s$ と書いたとき、 ϕ_s を同期位相と呼びます。
スリッページ	粒子の運動量 p と円形加速器の周回時間 T の対数変化率の比をスリッページと呼び、 $dT/T = \eta dp/p$ で表します。スリッページは、運動量による粒子の速度の違い及び軌道長の違い(→注:モーメントムコンパクション)によって決められ、 $\eta = (\alpha - 1/\gamma^2)$ の関係があります。
モーメントムコンパクション	粒子の運動量 p と円形加速器内での周回軌道長 C との対数変化率の比をモーメントムコンパクションと呼び、 $dC/C = \alpha dp/p$ で表します。モーメントムコンパクションは、運動量分散関数を円形加速器一周分で積分したものに なります。
色収差(クロマティシティ)	運動量のずれ dp をもつ粒子はベータトロンチューンが変化します。このときのチューンのずれ dv を dp/p で割ったものを色収差(クロマティシティ)と呼びます。したがって、色収差のあるリングで、ビームの運動量を調整することにより、ベータトロンチューンを調整することが可能です。
動的口径 (ダイナミックアパーチャー)	6 極およびそれ以上の多極磁界成分はビームの水平方向・鉛直方向の変位に対して非線形の力を及ぼします。このような非線形な磁界成分の存在下では、ビームが安定に周回可能な空間的な領域の大きさ(ベータトロン振動の振幅)が制限されることが知られています。この領域の大きさを動的口径と呼ぶ。多極磁界成分の由来としては、色収差補正のために導入する 6 極磁界、マグネットの磁極端部で発生する多極磁界、磁極の製作上の誤差によるもの等があります。
ベータトロン振動の共鳴	ベータトロン振動の振幅が、円形加速器の周期的磁界からの力で共鳴的に増大する現象をベータトロン振動の共鳴と呼びます。水平/垂直方向のベータトロンチューンを v_x/v_y とすると、ベータトロンチューンが $kv_x + mv_y = N$ (ここで k, m, N は整数) の条件をみたすとき、共鳴現象が起こります。 $ k + m $ を共鳴の次数と呼び、次数が 2 の場合を半整数共鳴または 2 次共鳴、3 の場合を 3 次共鳴と呼びます。共鳴ビーム取出しでは半整数共鳴または 3 次共鳴が用いられています。

ベータトロン振動の共鳴	ベータトロン振動の振幅が、円形加速器の周期的磁界からの力で共鳴的に増大する現象をベータトロン振動の共鳴と呼びます。水平/垂直方向のベータトロンチューンを v_x/v_y とすると、ベータトロンチューンが $k v_x + m v_y = N$ (ここで k, m, N は整数)の条件をみたすとき、共鳴現象が起こります。 $ k + m $ を共鳴の次数と呼び、次数が2の場合を半整数共鳴または2次共鳴、3の場合を3次共鳴と呼びます。共鳴ビーム取出しでは半整数共鳴または3次共鳴が用いられています。
共鳴取出し	上記「ベータトロン振動の共鳴」を意図的に引き出すことによってビームの振動を増大させ、取出し領域へ誘導するビーム取出し方式です。この共鳴条件を満たす粒子は周回毎に振幅を増大して行き、ビーム取出し領域に設置された取出し用セプタムに到達すると横方向の力を受け、円形加速器から取り出されます。
入射装置	ビームを円形加速器に入射するための装置で、セプタムマグネット、セプタム電極、バンパマグネット及びその電源等から構成されます。
取出し装置	ビームを円形加速器から取り出すための装置で、ビームを「蹴り出す」取出しでは、キッカーマグネット及びセプタムマグネット、一方「共鳴取出し」では共励起用の多極マグネット及びセプタム電極並びにセプタムマグネットまたその電源等から構成されます。
キッカーマグネット	ビームに対しパルス的な横方向の力を与えるマグネットです。円形加速器へのビーム入射、またはそこからビーム取出しに用いられます。ビームの周回時間より短い立ち上がり時間が必要となるため、通常、1 μ s以下の立ち上がり時間で励磁されます。
セプタムマグネット	セプタムマグネットは、取出し(あるいは入射)ビームにのみ作用し、周回ビームには影響しないような急峻な磁界分布を形成します。この取出し(入射)用磁界を発生させるために、通常、周回ビーム領域と取出し(入射)ビーム領域の境界には、コイルや金属板等が存在し、これがビームを遮ることで取出し(入射)効率が制限されてしまいます。
マスレスセプタム	セプタムマグネットのコイルと磁極の形状をある条件を満たすようにすることで、コイルの厚みを零にすることが可能です。このようなセプタムマグネットをマスレスセプタムと呼び、極めて高い効率でビーム取出しが可能となります。
高温超伝導体 高温超伝導線	一般的に約25 K以上で超伝導転移する物質のことを高温超伝導体と呼びます。このような高温超伝導体で作られた電線が高温超伝導線です。現在製造されている高温超伝導線の多くは、製造プロセス上の都合からテープ形状をしています。
大電流容量導体	超伝導線には臨界電流という超伝導状態で流せる電流の上限が存在します。ある超伝導線の臨界電流以上の電流容量を実現するため、複数の超伝導線を束ね集合化するということがしばしば行われますが、このようなものを大電流容量導体と呼びます。代表的な大電流容量導体として、RoebelケーブルとCORCケーブルが存在します。Roebelケーブルは超伝導線を厚さ方向に積み重ねたうえで転位を施した構造をもち、比較的電流密度が高い導体です。CORCケーブルは超伝導線を銅の芯の周囲に螺旋状に多層に巻き付けた構造をもち、機械的自由度が高いことが特徴です。
臨界電流(密度)	超伝導線内に、超伝導状態を維持しながら流すことができる最大の電流(密度)のことを臨界電流(密度)と呼びます。これ以上の電流(密度)を印加すると超伝導状態が破れ、常伝導状態になります。
Kimモデル	臨界電流(密度)は、超伝導線の経験磁界に依存し、一般に経験磁界が大きくなるにつれ低下しますが、臨界電流(密度)を経験磁界の関数として表現するモデルの一つがKimモデルです。

パーコレーション遷移モデル	高温超伝導体ではピン止め力が広く分布しており、またその使用温度の高さと結晶構造に起因する熱揺らぎの影響が大きいことから、局所的臨界電流密度が分布したランダム系となっています。高温超伝導体の物性を表現する統計的なモデルがパーコレーション遷移モデルです。
磁束量子線	実用的な通電電流もしくは経験磁界下においては、超伝導線内には磁束が侵入します。このとき、侵入する磁束は量子化されており、量子化された磁束の通る領域が磁束量子線と呼ばれます。
ピン止め力	量子化された磁束は、超伝導線の超伝導層に存在する析出物や格子不整等によって捕捉され、ピンで止めたように動かなくなります。この量子化磁束を捕捉する力のことをピン止め力と呼びます。
人工ピン	超伝導体の臨界電流密度を向上させるためには、量子化磁束を超伝導体内に均一に分布させればよいことが知られています。量子化磁束を侵入しやすくし、臨界電流密度を向上させるために、人工的に結晶欠陥(人工ピン)を導入することが近年の超伝導線では行われます。
交流損失	超伝導体に時間的に変化する磁界もしくは電流が印加された場合、量子化された磁束にはローレンツ力が働きます。このローレンツ力がピン止め力に打ち勝つと量子化された磁束は動き出し、その過程でなされる仕事が交流損失です。その際、超伝導体内に電界が発生します。
冷凍機	高温超伝導線を超伝導状態にするためには数十ケルビンに冷却する必要がありますが、それに使用されるのが冷凍機です。通常、コールドヘッドと呼ばれる冷凍機の極低温になる部分と超伝導コイルの間は銅のような熱伝導のよいもので接続されます。冷凍機の運転効率は温度が上昇するほど高くなります。
スーパーフェリックマグネット	超伝導コイルと鉄ヨーク・鉄磁極を組み合わせ、鉄ヨークにより磁気抵抗を抑えつつ超伝導コイルによる強い起磁力を利用して効率よく磁界を発生し、鉄磁極の形状設計と精密製作によって磁界分布を高精度で制御する加速器用マグネットのことです。
超伝導マグネット 超伝導コイル 鉄ヨーク	超伝導マグネットは、超伝導線から構成される超伝導コイルとマグネットを磁気回路とみたときの磁気抵抗を減らす鉄ヨークから構成されます。このうち、超伝導コイルは数十ケルビン程度の低温部に、鉄ヨークは室温部又は低温部に配置されます。
磁極	鉄ヨークの一部で、鉄ヨークから磁界発生領域を挟むような形で配置されている鉄のことを磁極と呼びます。磁極の形状によってビームが通過する領域の磁界分布が変化します。
電磁界解析	超伝導線や鉄ヨークは非常に非線形性の強い特性をもつ物質から構成されており、これらから構成されるマグネット内の電磁現象は非常に複雑です。これらの現象を理解するために、Maxwell 方程式に基づくコンピュータシミュレーションによる電磁界解析が有用です。