

原子力システム研究開発事業 令和2年度成果報告会
2021年3月17日
Webex

(平成28年度－令和元年度実施)
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

委託先：京都大学

研究代表者：雨宮 尚之（大学院工学研究科）

KYOTO UNIVERSITY

京都大学



ADS早期実現に対する社会的ニーズと本研究の長期的目標

ADSは、使用済み燃料に由来するマイナーアクチノイドやプルトニウムを安定核や短寿命核に変換可能

使用済み燃料からの放射性廃棄物の処分と、プルトニウムの管理に資する技術

将来の原子力発電量の多寡によらず、社会のニーズは極めて高い

大型ADSの検討が先行しているが、大強度線形加速器の開発に要する期間、実証炉建設という開発段階の必要性から、早期実用化は困難

放射性廃棄物処分・プルトニウム問題の先送りは、社会的に許されない状況

技術実現性と安全性に優れたコンパクトADS（C-ADS）を2040年ころに社会実装

研究目標と全体研究計画

ADS実現に向けての技術課題と設定した研究目標

原子炉工学分野の技術課題	加速器工学分野の技術課題
- 液体金属ターゲット(Pb-Bi) - ビーム取出し窓 - 原子炉構造物の熱疲労	【線形加速器の課題】 - 広大な敷地面積(50 m × 600 m) - ビーム停止による安定なビーム供給の阻害←多数の高周波加速装置を用いるため
	【円形加速器の課題】 大きな消費電力←ビーム偏向用マグネット

研究目的：核変換により放射性廃棄物の有害度を低減するADS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、そのプロトタイプ開発の見通しを確立

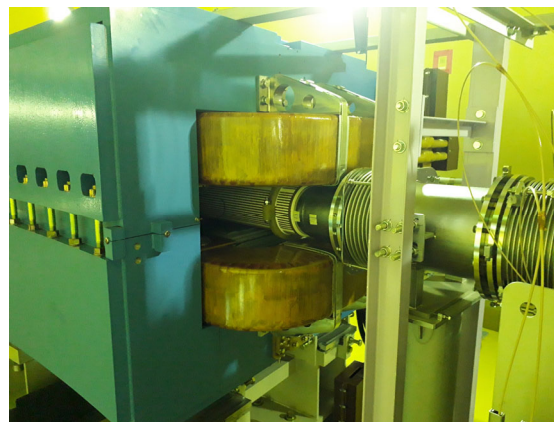
研究目標：1.5 MW（ビームエネルギー1.5 GeV、ビーム電流1 mA）、消費電力5.0 MWのプロトタイプADS用円形陽子加速器の実現見通し確立

ADS用陽子ビーム供給源としての各種加速器の比較

	利点	欠点
線形加速器	• 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	• 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	• 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	• 高エネルギー化が困難
シンクロトロン	• 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	• 大電流化が困難
高繰り返しシンクロトロン (RCS)	• 高エネルギー (> 1 GeV) • 大電流 (> 1 mA) • コンパクト (20 m × 20 m) • 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、交流運転のため困難 • ビーム取り出しの難しさ

高繰り返しシンクロトロン（RCS）への優位性と課題と解決法

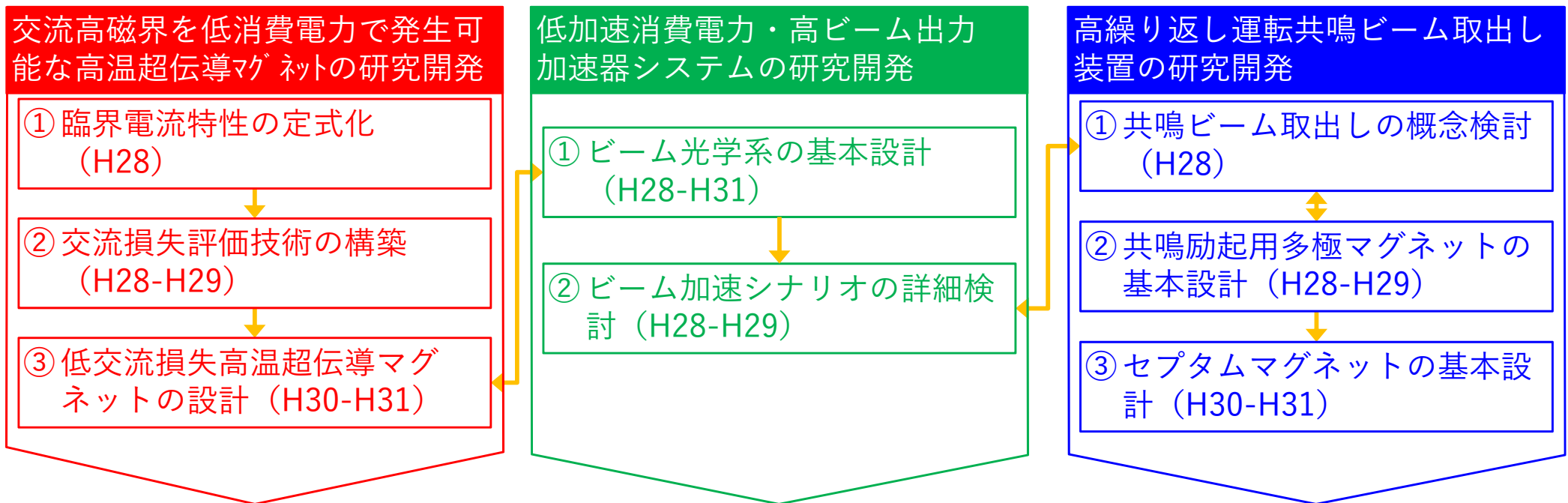
1. 円形加速器の一種であるRCS（高繰り返しシンクロトロン）に着目
 - ビームの安定供給（高信頼化）が可能 . . . 線形加速器に対する優位性
 - 小型化が可能 . . . 線形加速器に対する優位性
 - 高エネルギー・大電流が同時実現可能 . . . サイクロトロンに対する優位性
2. RCSの課題と解決のアプローチ . . . 主に線形加速器と比較して
 - 消費電力大 . . . マグネット高温超伝導化
 - ビーム取出しの難しさ . . . 共鳴ビーム取出しの適用



低温超伝導・高温超伝導の比較：高温超伝導に着目する理由

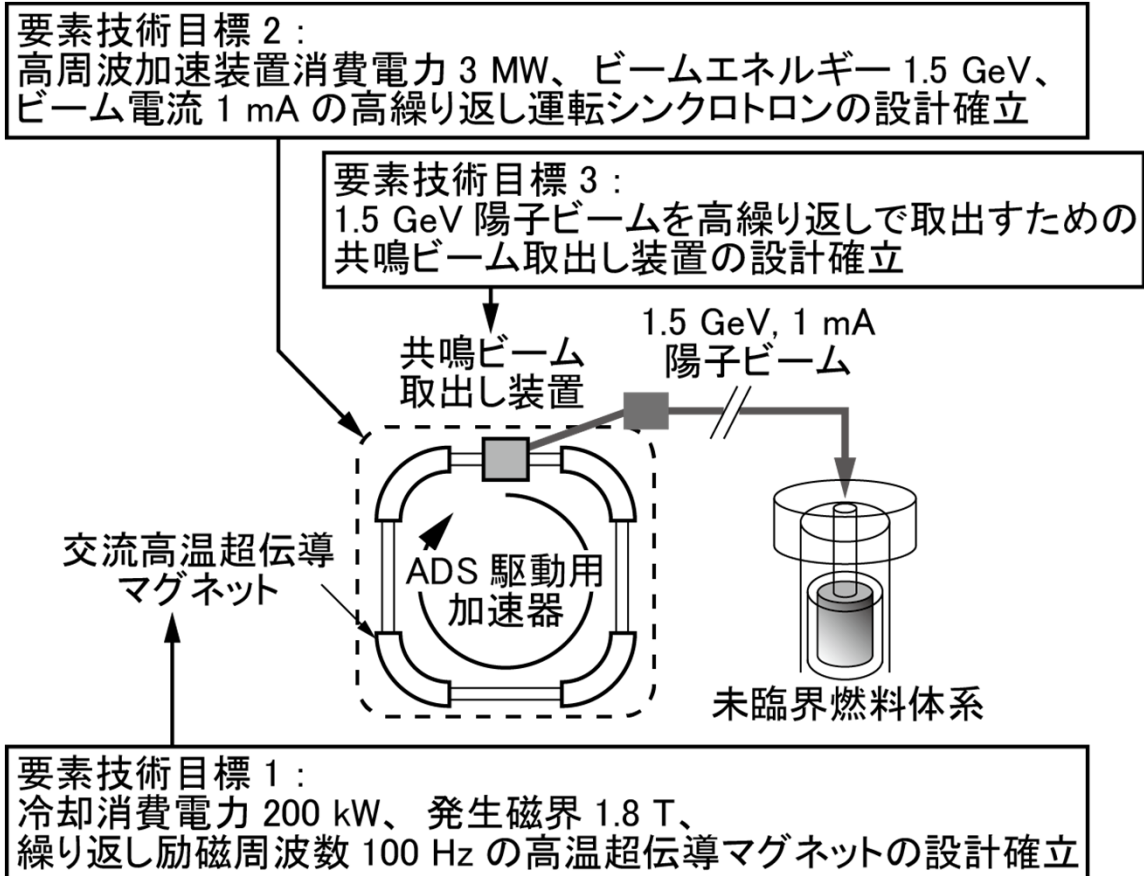
	低温超伝導マグネット	高温超伝導マグネット
代表的な超伝導線	NbTi線	REBCO線
運転温度	4.2 K（液体ヘリウム冷却）	65 ~ 77 K（液体窒素冷却）
冷却装置の効率	0.1 ~ 0.2%	5 ~ 10%
交流運転の実現性	冷却効率が低いため、交流運転に伴って発生する交流損失による発熱の除熱が困難 → 低温超伝導での交流超伝導マグネットは 非現実的	交流損失の除熱は合理的な消費電力で可能 → 交流超伝導マグネットは 実現可能

課題解決を目指した全体研究計画と全体目標



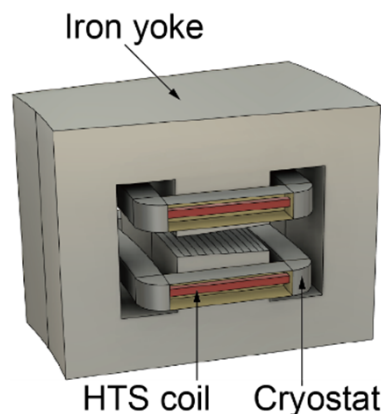
全体目標：ビーム電力1.5 MW（ビームエネルギー1.5 GeV、ビーム電流1 mA）、消費電力5 MWのプロトタイプADS用円形陽子加速器システムの実現見通し確立

研究の全体像と要素技術目標

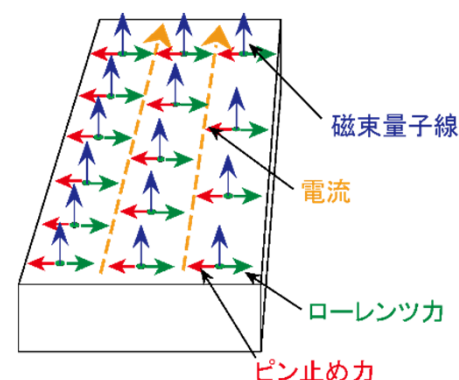


研究成果

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 (1)



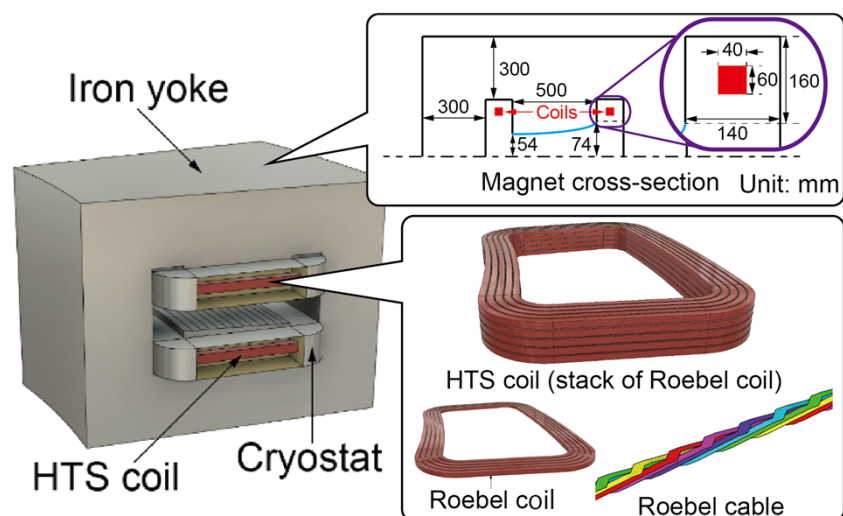
高温超伝導コイルと鉄ヨークから構成される
交流高温超伝導マグネット



量子化して超伝導線に侵入した磁束
が動くことによる「交流損失」

- 交流高温超伝導マグネットの低消費電力設計を行うため、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解析手法を開発
- 超伝導コイルの交流損失と鉄ヨークの鉄損を最小化するために、超伝導コイル・鉄ヨークの形状を最適化

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 (2)

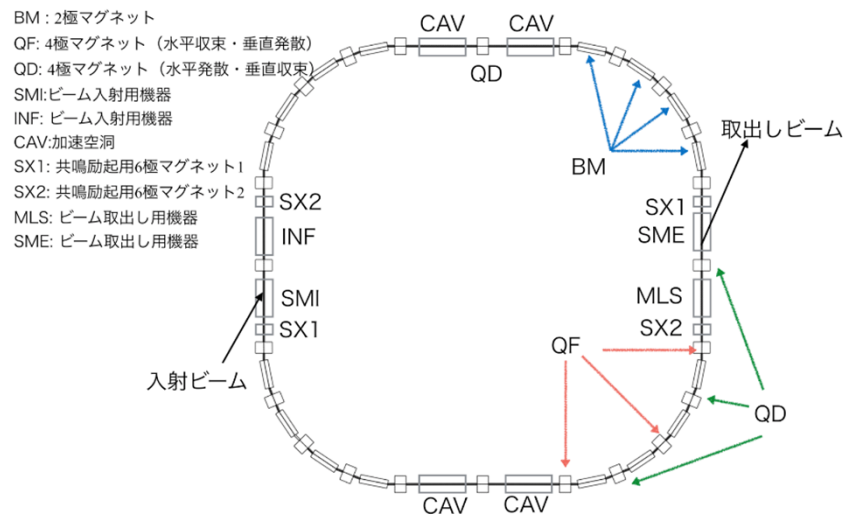


概念設計した高温超伝導マグネットの諸元	
マグネットの磁極長さ	1 m or 2 m
ケーブル	Roebelケーブル
コイル形状	積層変形レーストラックコイル
アンペアターン	74445.7 A (最大値)
周波数	100 Hz
コイル運転温度	65 K
コイル/鉄ヨーク消費電力 (加速器1基あたり)	79 kW / 250 kW

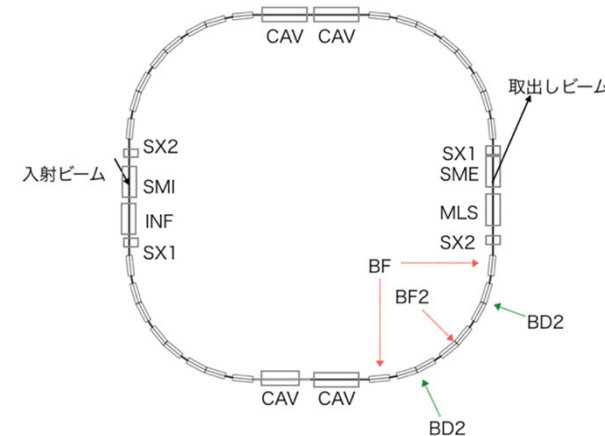
- 銅コイルを高温超伝導コイルに置き換えることにより、コイル消費電力を740 kWから79 kWに低減
- コイルの高温超伝導化に伴い、鉄ヨークが小型化でき、鉄ヨーク消費電力を350 kWから250 kWに低減

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)

- 機能分離型マグネットを使った加速器と機能結合型マグネットを使った加速器の設計検討を実施
- 消費電力・ビームの安定性の観点から、マグネット長さが1 mと2 mの機能結合型マグネットを組み合わせた加速器を標準設計として採用



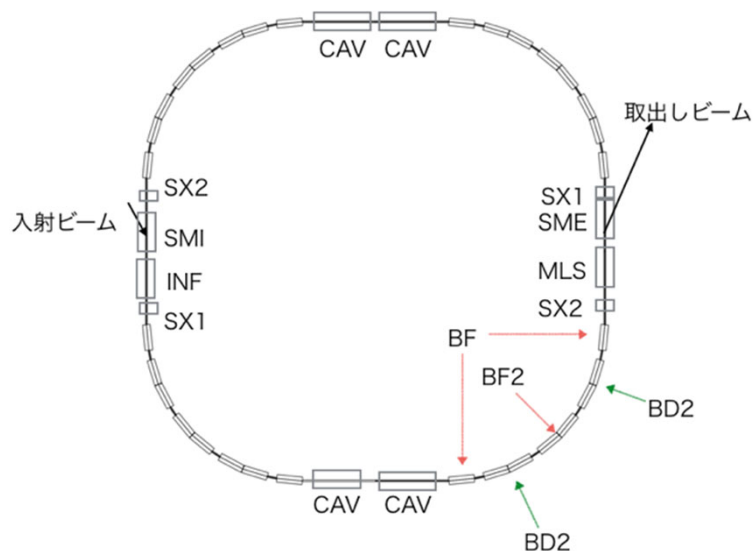
機能分離型マグネットを使った加速器



機能結合型マグネットを使った加速器

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 (2)

- 「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、最適化されたマグネットの磁界分布を用いてビーム安定性を評価
- 機能結合型マグネットを使った、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の概念設計に成功

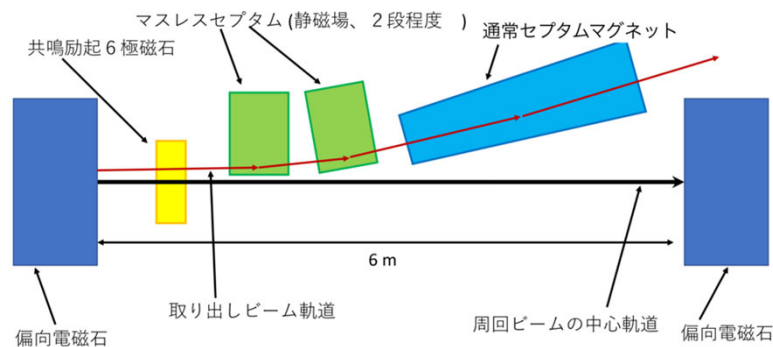


設計された加速器の基本パラメータ

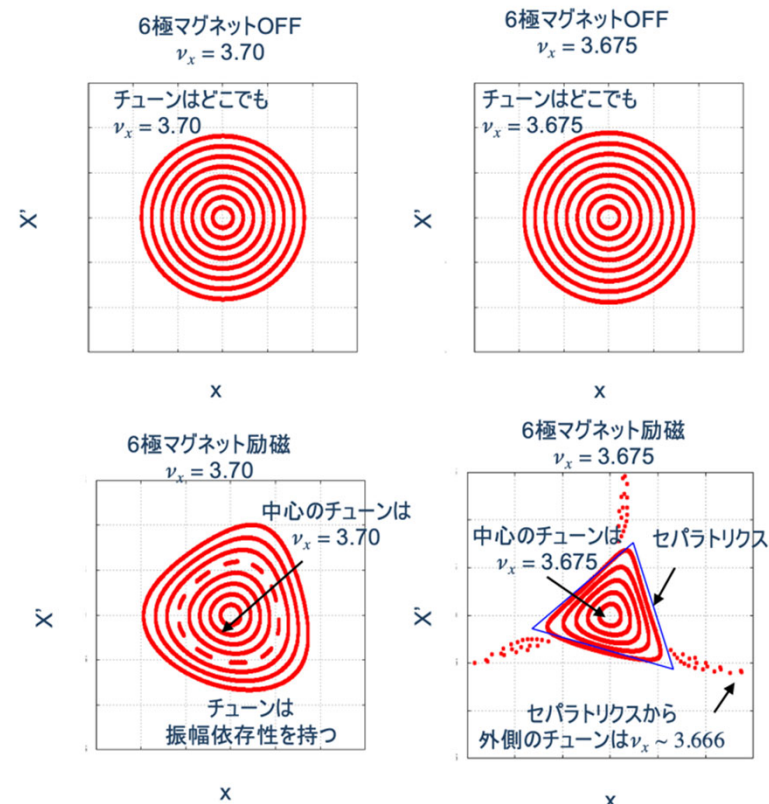
曲率半径	5.36 m
周長	68.9 m
マグネットの台数	20
マグネットの長さ	1 m (8台)/2 m (12台)
長直線部の長さ	7.625 m
設置面積	20 m × 20 m

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と、ビーム取出しに必要なセプトラムマグネットの基本設計を実施
- 時間的に変化する各種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を反映させたビームシミュレーションを実施



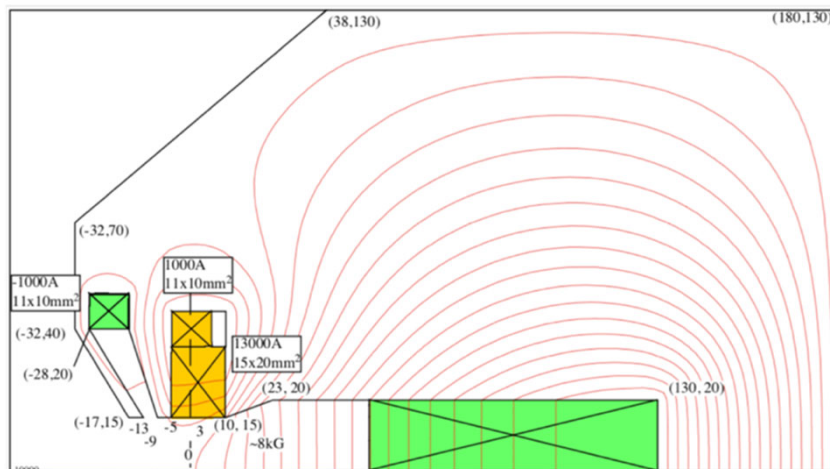
取出し部の構造



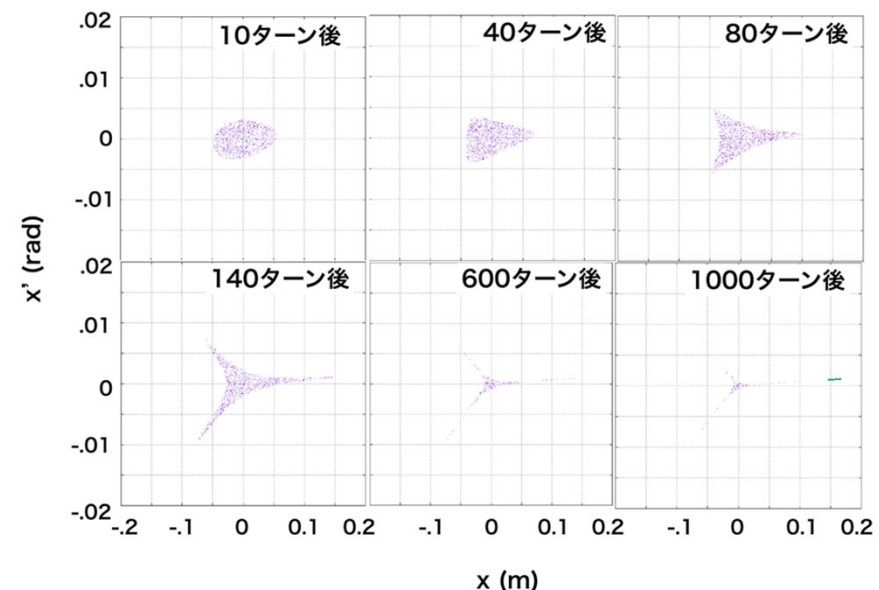
共鳴によるビーム取出しの概念図

高繰り返し運転共鳴ビーム取出し装置の研究開発 (2)

- 共鳴ビーム取出しに必要なセプタムマグネットを設計
- 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が可能である、セプタムマグネットを用いた共鳴ビーム取出しが可能であることを確認



セプタムマグネットの磁界分布



共鳴ビーム取出し時のビームシミュレーション

研究効果

- 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、
- 表に示すような、使用済み燃料の有害度低減の見通しを立てた。

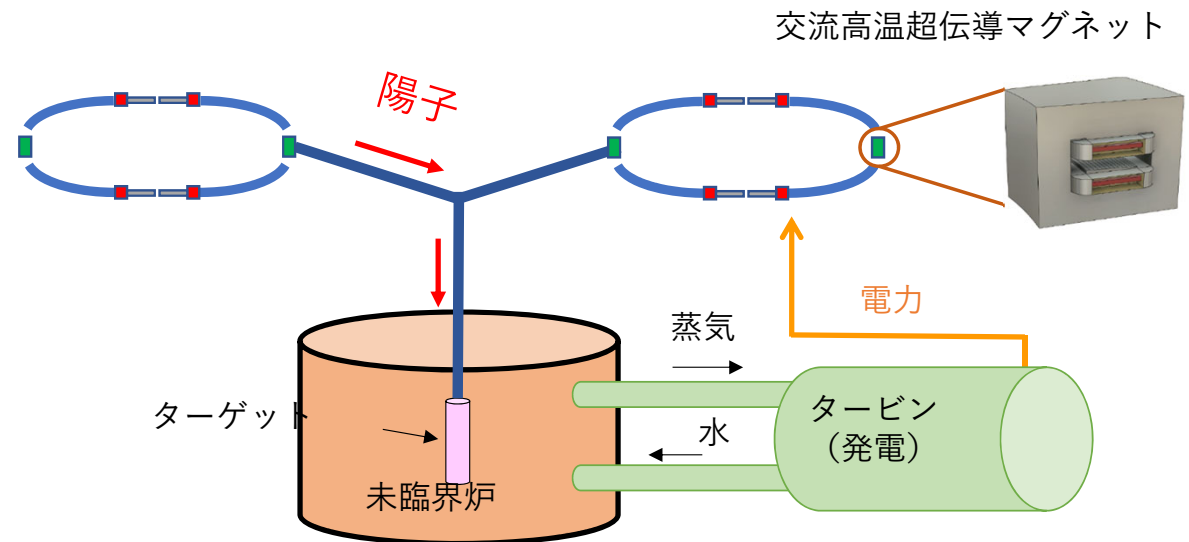
将来のADSによるマイナーアクチノイドの処理の見通し		
加速器のビームパワー	1.5 MW	1.5 MW
加速器の並列数	1	3 ~ 7
原子炉熱出力	40 MW	200 ~ 400 MW
マイナーアクチノイドの年間処理量	2 kg	10 ~ 20 kg


C-ADS

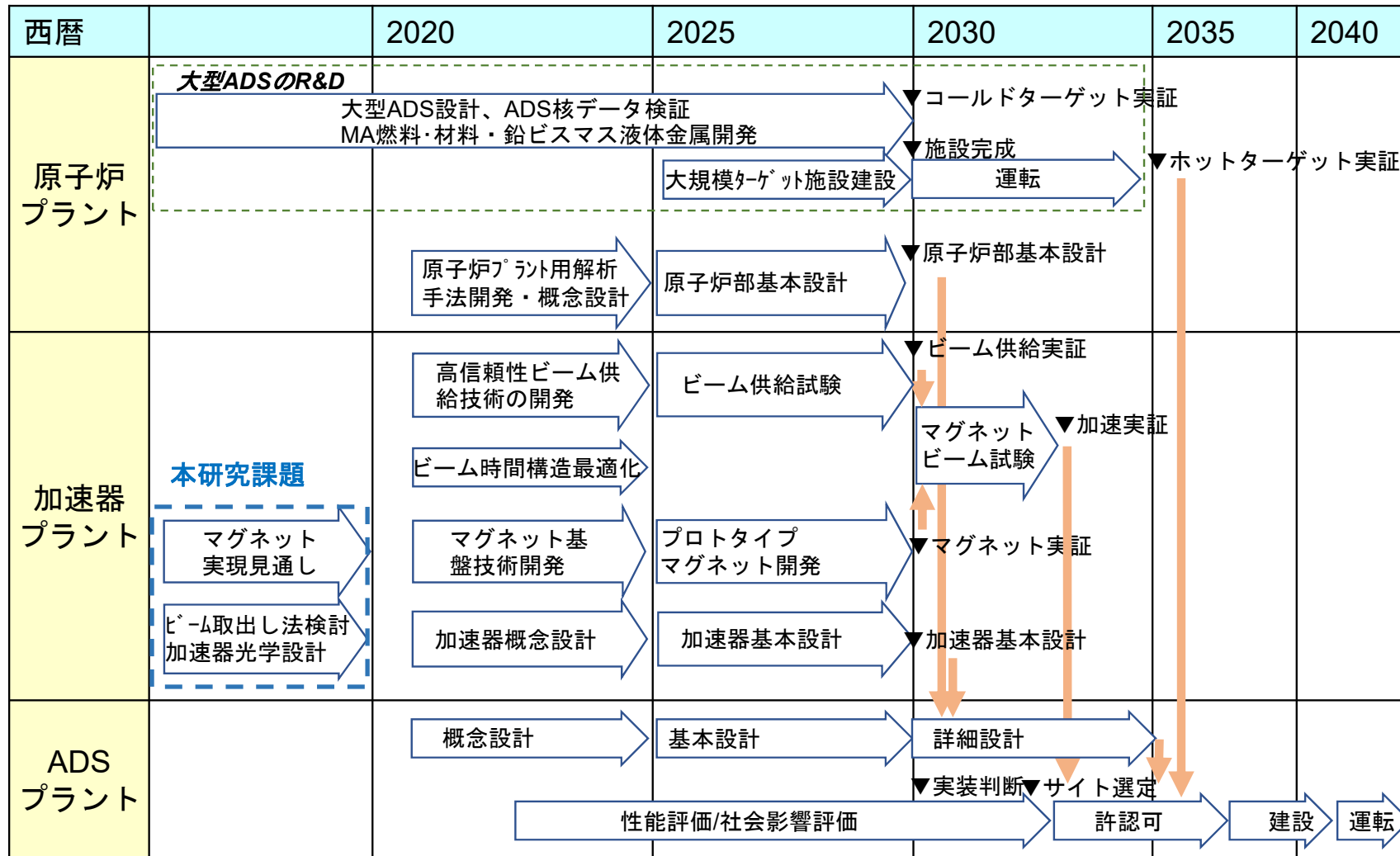
今後の展開に向けて：C-ADSの提案

- 本研究開発と並行して、京大、原子力機構、物材機構の研究者で、2017年2月から21回にわたり、「ADS・円形加速器・超伝導に関する勉強会」を開催し、C-ADS（コンパクトADS）というコンパクトなADS概念を提案
- C-ADS：現状技術からの技術ギャップが小さく、早期実現が可能

プロトタイプC-ADSの諸元	
熱出力	200 ~ 400 MW
ビームエネルギー	1.5 GeV
RCS1基あたり ビーム電流	1 mA
RCS並列基数	3 ~ 7
ビーム電流	3 ~ 7 mA
ビームパワー*	4.5 ~ 10.5 MW



C-ADS開発のロードマップ



まとめ

- 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、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の欠点を克服できることを解明
- 従来検討されてきた線形加速器に比較し、小型でビームの安定供給が可能な、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
- 概念設計したRCSの並列利用に基づいた、技術的実現性が高く安全性に優れたC-ADSを提案

ビームエネルギー	1.5 GeV
ビーム電流	1 mA
ビームパワー	1.5 MW
繰り返し周波数	100 Hz
設置面積	20 m × 20 m
消費電力	4.1 MW

