

科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会  
原子力科学技術委員会 原子力研究開発・基盤・人材作業部会  
群分離・核変換技術評価タスクフォース（第2回）  
2021年9月3日（金）

資料3-1  
科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会  
原子力科学技術委員会 原子力研究開発・基盤・人材作業部会  
群分離・核変換技術評価タスクフォース（第2回）  
R3. 9. 3

## C-ADS（コンパクトADS）

－ 高繰り返しシンクロトロンと低出力炉心を  
組み合わせたADSの新コンセプト －

京都大学 大学院工学研究科 電気工学専攻

雨宮 尚之

KYOTO UNIVERSITY

京  
都  
大  
学



# C-ADSのコンセプト

## 従来の大型ADSにおける課題と、課題解決に向けた着想

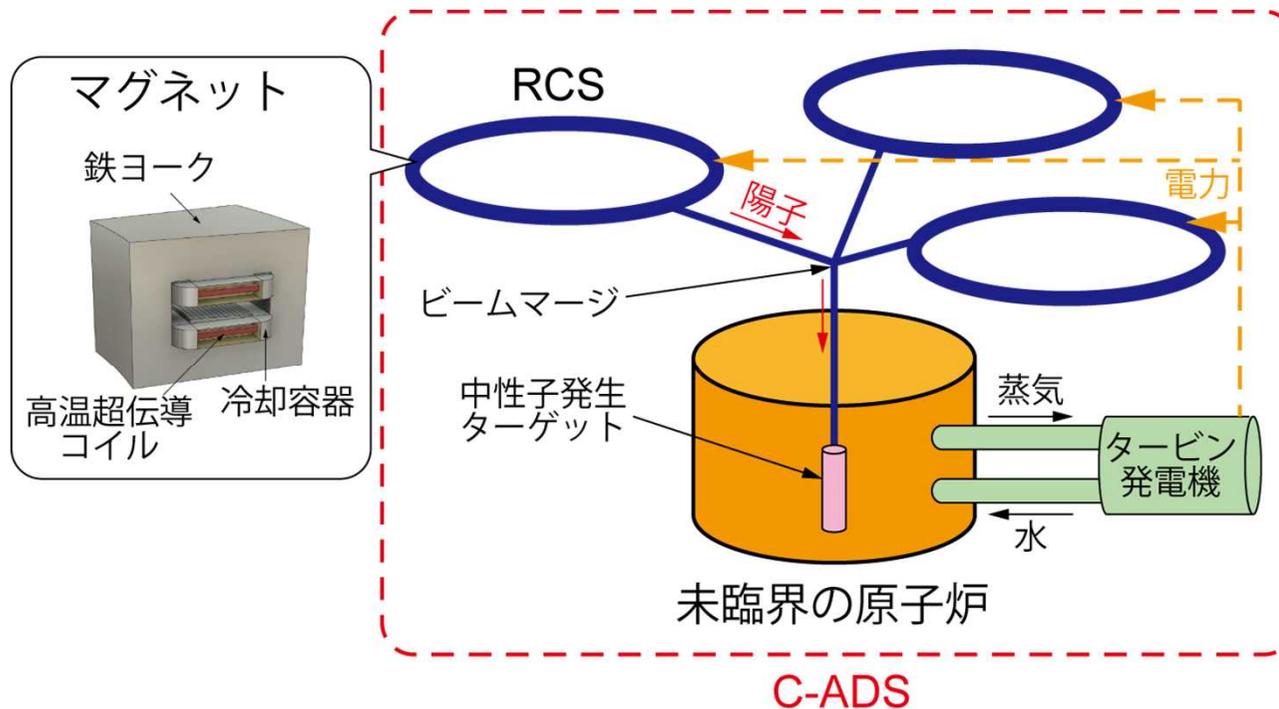
	加速器	原子炉
従来の大型ADSにおける課題	<p>大強度線形加速器に起因した課題</p> <p>—本質的課題—</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 多数直列した高周波加速装置の一つの障害がビーム停止に直結</li> <li>• 長大な設置スペース (~ 600 m)</li> </ul> <p>—研究開発課題—</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 大強度ビーム発生のための加速空洞・電源の開発</li> </ul>	<p>高出力炉心に起因した課題*1</p> <p>—本質的課題—</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 除熱量・事故時の崩壊熱が大きいため、ポンプ・除熱機能喪失時の影響大</li> </ul> <p>—研究開発課題—</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 高負荷に耐えるビーム窓・被覆管材料の開発</li> </ul>
課題解決に向けた着想	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 並列円形加速器*2の適用</li> <li>• 高周波加速装置の直列段数削減、加速器並列冗長化→ビーム停止頻度低減</li> <li>• 設置スペース短小化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 炉心の低出力化</li> <li>• 自然循環による安全性向上の可能性</li> <li>• SMRの開発成果の活用</li> </ul>

\*1 低コスト化の観点から大電流の加速器の適用が想定され、そのため炉心出力も大きくなっていた。

\*2 円形加速器の前段に、低エネルギーの線形加速器は必要である。

## C-ADSの構成と仕様例

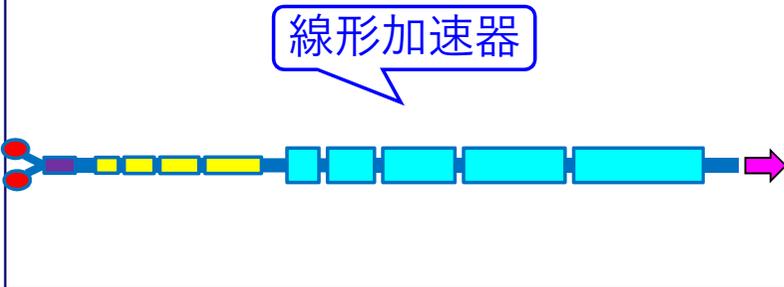
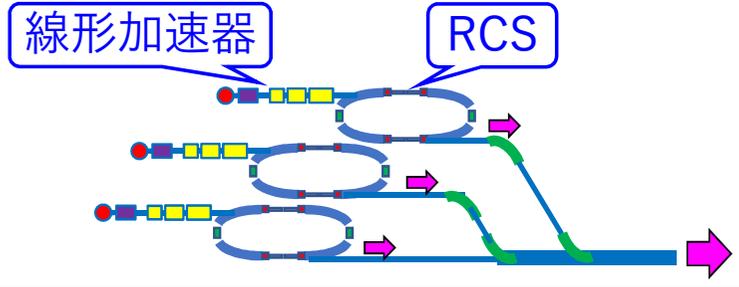
C-ADS（コンパクトADS）とは、高繰り返しシンクロトロン（RCS）を複数基並列化した陽子ビーム源と、小型未臨界炉心を組み合わせたADS



加速器	
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

原子炉	
熱出力	200 ~ 400 MW

# 大型ADSとC-ADSの加速器の比較

	大型ADS	C-ADS
概念図	 <p>線形加速器</p>	 <p>線形加速器      RCS</p>
加速器の種類と大きさ	<ul style="list-style-type: none"> <li>線形加速器 (1.5 GeV, 20 mA, 30 MW)</li> <li>長さ600 m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>線形加速器 + RCS (1.5 GeV, 1 mA, 1.5 MW) × 3~7基</li> <li>20 m × 20 m (RCS 1基あたり)</li> </ul>
炉への入射陽子	•1.5 GeV, 20 mA, 30 MW	•1.5 GeV, 3 mA ~ 7 mA, 4.5 MW ~ 10.5 MW
加速器技術の現状	•J-PARCリニアック : 0.4 GeV, 0.325 mA, 0.13 MW → 相当な研究開発が必要	•J-PARC RCS : 3 GeV, 0.333 mA, 1 MW ~ 概ね、C-ADS実現に必要な技術水準
加速器の効率	•偏向マグネットが不要なので高効率	•マグネットを超伝導化して効率改善
ビームの安定供給性能	•高周波加速装置を多数直列に接続するため、 <b>ビーム停止の頻度高</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>円形加速器は高周波加速装置少</li> <li>低エネルギーの線形加速器は高周波加速装置の直列数少</li> <li>さらに、RCSを並列化して冗長性確保 → ビーム停止の頻度を低減</li> </ul>

# C-ADSの低出力未臨界炉心の例



- 早期実用化が可能なRCSを適用
  - 早期実用化が可能なRCSの出力陽子ビームは、中小型炉に相当
- ⇒開発が活発化しているSMR概念等との組み合わせが可能

JAEAが開発している大型ADS設計を基にした、自然循環を利用し安全性を高めた小型炉心

出力：200~400MWt

冷却：鉛ビスマス自然循環

GEH社が開発しているPRISM炉心を改良して、核破碎ターゲットループを追加した炉心

出力：300MW (750MWt)

冷却：ナトリウム

Proton beam

Reprocessing device

Ar

Core

HX

To drain tank

JAEAが概念設計している溶融塩炉心

出力：400MWt

冷却：鉛塩化物

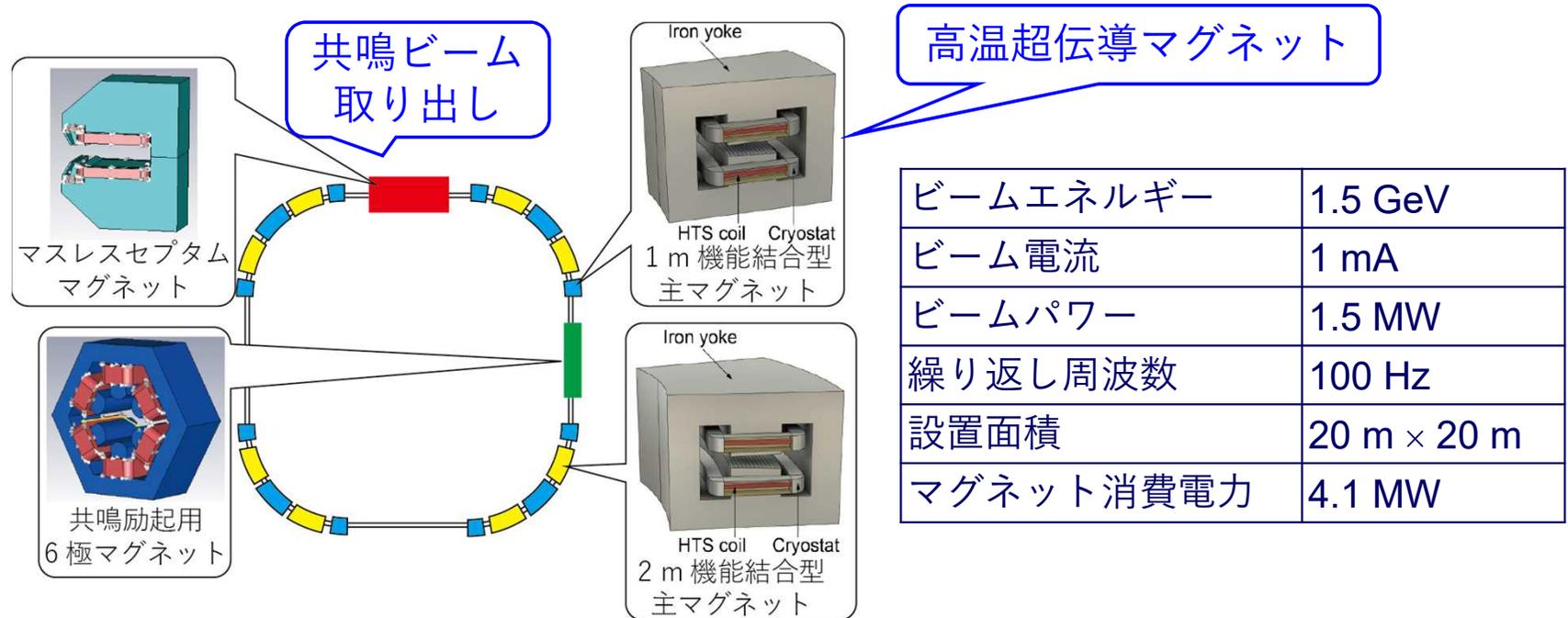
## C-ADSの独創性・革新性、特徴

- 高周波加速装置の直列数の少ない **RCS** を適用し、さらに加速器を **並列化** して、**ビーム停止の頻度を低減**
  - J-PARCの運転実績をもとにした概算によれば、同じビーム強度（1 MW）で比較して、RCS（+前段線形加速器）のビーム停止回数は、線形加速器のみの場合と比べて約2.5分の1
  - 並列化でビーム停止回数はさらに低減
- 交流ビーム偏向マグネットによる消費電力増大という欠点は、**高温超伝導** で克服
- **自然循環** を用いた炉心冷却により、**受動的安全性** を実現
- 要素機器（マグネットなど）単体の技術開発を行えば、その組み合わせで大規模加速器を実現可能（例：欧州のLHC、長さ15 mの超伝導マグネット単体を開発 → 1,200台並べて周長27 km（JR山手線規模）のシンクロトロンを建設）
- 1.5 GeV, 1 mA級RCSは現状技術からの飛躍小 → **早期の社会実装可能**
  - 並列RCS = モジュール化されたシステム

## 原子カ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」（平成28～令和元年度）  
の成果

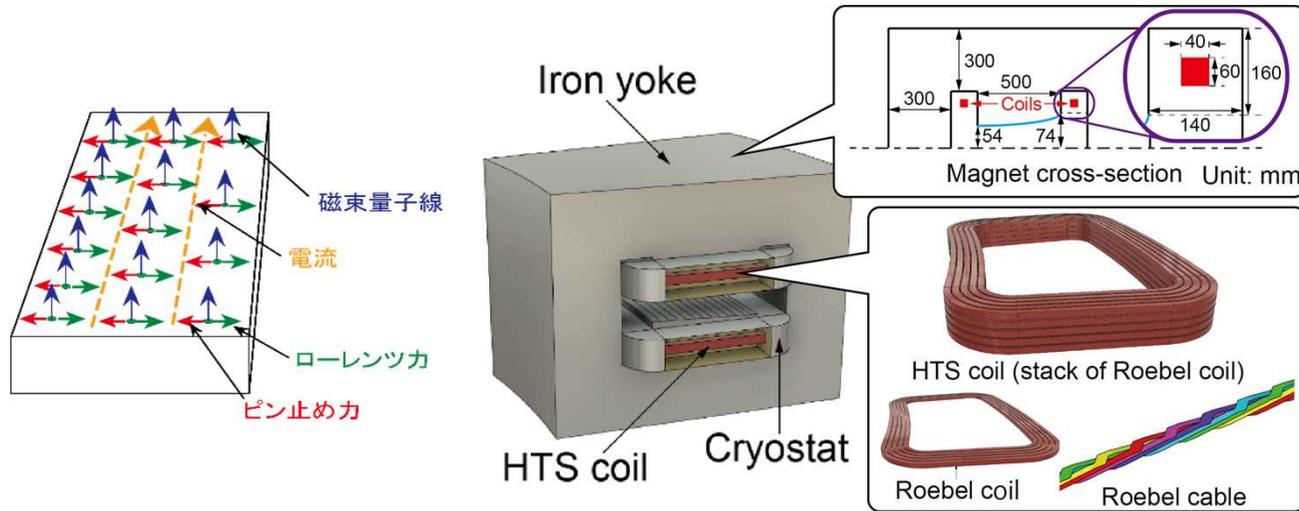
# ADS用RCSの概念設計



高温超伝導マグネットと共鳴ビーム取り出しを用いたADS用RCSの概念設計を提示

- 高温超伝導マグネット→低消費電力化
- 共鳴ビーム取り出し→ビーム取り出しの高信頼化

# 高温超伝導マグネットの概念設計



超伝導線を交流で使うと、量子化して侵入した磁束が動くことによる交流損失が発生

HPC\*技術により、磁束量子線の動きに伴う交流損失を低減した高温超伝導マグネットを設計

高温超伝導マグネットの諸元	
マグネット	1 m, 2 m
ケーブル	Roebel ケーブル
起磁力	74 kA Max.
周波数	100 Hz
運転温度	65 K
消費電力 (加速器1基分)	79 kW + 250 kW

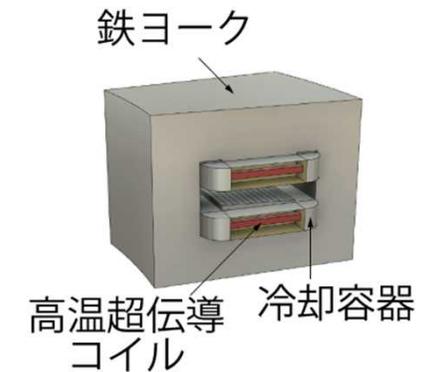
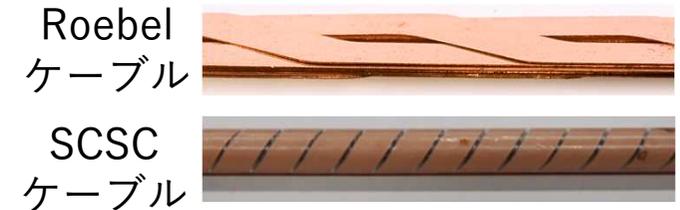
\* High Performance Computing

- 銅コイルを高温超伝導コイルに置き換え：コイル消費電力を740 kWから79 kWに低減
- コイルの超伝導化に伴い鉄ヨークが小型化：鉄ヨーク消費電力を350 kWから250 kWに低減

# C-ADS実現に向けた技術課題と研究開発要素

## 超伝導マグネット実現のための研究開発要素

- 高温超伝導大電流ケーブルのコイル化技術
  - インダクタンス低減、巻き線製作性向上
- うず電流対応クライオスタット技術
  - コイルを収納する冷却容器
- 鉄芯損失低減技術
  - 直流オフセット成分を含む電流による励磁
- 小型技術実証マグネットから実機級マグネットの開発へ
  - 単機の開発が完了すれば、それを並べることにより加速器実現（例：15 mマグネット1,200台→周長27 kmのLHC）



J-PARCの常伝導マグネット

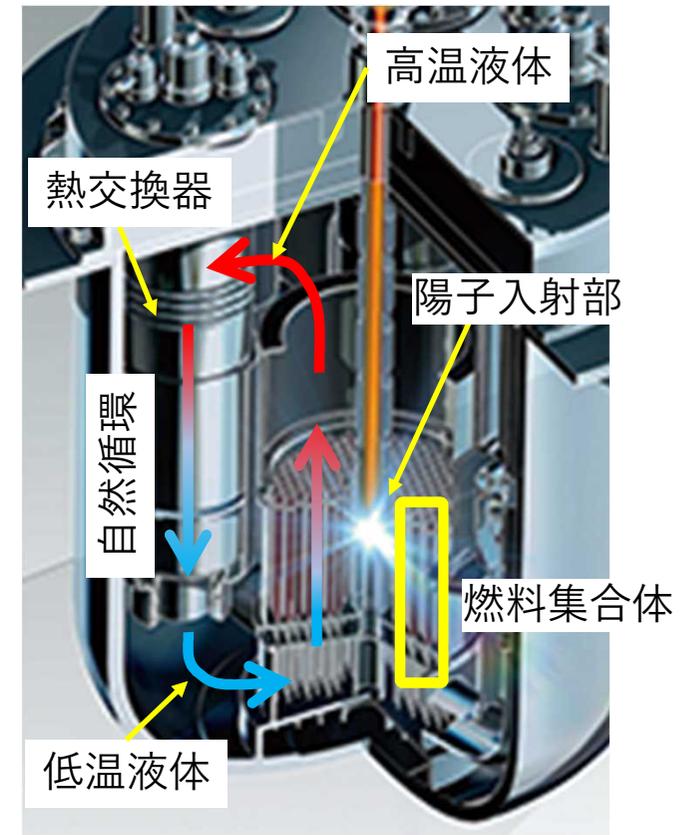
## C-ADSの陽子ビーム源としてのRCSの研究開発要素

- 1.5 GeV, 1 mA, 100 Hzという大強度・高繰り返しRCS実現のための研究開発要素
  - 空間電荷効果（荷電粒子間の反発力）に抗してビームを安定に加速するための加速器構成（マグネットや高周波加速装置）の探索と設計
  - RCSへの入射機器（H+が周回するRCSへH-を入射しH+荷電変換）とRCSからの取出し機器（キッカーマグネット・電源、共鳴取出し）
- ビーム停止頻度低減のための研究開発要素
  - ビッグデータ・AI等を応用したビーム停止予兆把握技術の開発（デジタルの低価格化→膨大データ取得・蓄積可能→膨大なデータの処理必要）
  - 各機器の技術的収れん度向上とシステムとしての最適化

## C-ADSの未臨界炉心の研究開発要素

- MA/TRU核変換に適した未臨界炉心の概念構築
  - 鉛ビスマス冷却炉心の場合のキーポイント：  
低出力化を活かした受動的に作動する簡素な自然循環炉心
- パルス陽子ビーム入射に適応したビーム窓とターゲットの開発、加速器仕様へのフィードバック
- 並列加速器の一部ビーム停止に伴う、炉入射陽子ビームパワー変動に適応する炉心設計の検討

大型ADSに比べて、安全性が高く、  
技術実現性の高い設計が目標



鉛ビスマス冷却炉の自然循環概念

## まとめ

- C-ADS（コンパクトADS）は、高繰り返しシンクロトロン（RCS）を複数基並列化した陽子ビーム源と、小型未臨界炉心を組み合わせたADS
- 高周波加速装置の直列数を低減し、また、円形加速器を並列化することにより、ビーム停止の頻度・時間を低減
- 自然循環を用いた炉心冷却により、受動的安全性を実現
- RCSにおける交流ビーム偏向マグネットによる消費電力増大は、日本が培ってきた交流高温超伝導マグネット技術で解決

# 補足資料

## (補足) C-ADSという概念創出に至る経緯

- 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」（平成28～令和元年度）：

C-ADSの陽子ビーム源としての高繰り返し運転シンクロトロン（RCS）のフェージビリティースタディ

- 「ADS・円形加速器・超伝導に関する勉強会」（京大・原子力機構・物材機構の研究者により、2017年2月～2020年3月にかけて21回開催）：

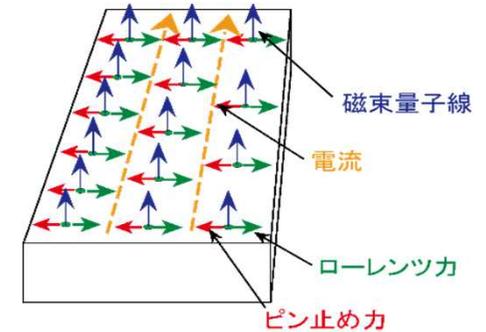
ADS・円形加速器・超伝導に関する技術について情報交換し、C-ADSの概念を創出

## ADS用陽子ビーム供給源としての各種加速器の比較

	線形加速器	サイクロトロン	シンクロトロン	高繰り返しシンクロトロン (RCS)
陽子ビームの高エネルギー化 ・ ADS要求仕様：1.5 GeV	1 GeV以上可能 例：J-PARC リニアック 0.4 GeV	1 GeV未満	1 GeV以上容易 例：LHC 7 TeV	1 GeV以上容易 例：J-PARC RCS 3 GeV
陽子ビームの大電流化 ・ ADS要求仕様：mA級以上	可能 例：J-PARC リニアック 0.325 mA	容易 (CW)	不可能 (パルス)	可能 (高繰り返し) 例：J-PARC RCS 0.333 mA
大きさ	長大	最小	中 (高磁界超伝導マグネットにより小)	中
ビーム偏向マグネット ・ 大電力を消費	不要	必要	必要	必要
ビーム偏向マグネットの超伝導化	N/A	実績多	実績多	交流損失のため困難
高周波加速装置の数 ・ ビーム停止の頻度に直結	多	少	少	少
例	J-PARC リニアック	SRC@理研	LHC@CERN	J-PARC RCS

# 低温超伝導・高温超伝導の比較、高温超伝導マグネットに着目する理由

- 超伝導線も交流で使うと、無損失ではない：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」が発生
- 下表に説明する交流運転の実現性に加え、高温超伝導線のコイル化技術が進展してきたことから、高温超伝導に着目



	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	<ul style="list-style-type: none"> <li>冷却効率が低く、交流損失による発熱の除熱が困難</li> <li>臨界温度が低く、交流損失によるわずかな温度上昇が致命的</li> <li>→ 低温超伝導線を用いた交流超伝導マグネットは<b>非現実的</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>交流損失の除熱が合理的な消費電力で可能</li> <li>臨界温度が高く、交流損失に対する温度上昇に対して頑強</li> <li>→ 交流超伝導マグネットは<b>実現可能</b></li> </ul>

## ADSによるMA処理量

ADSによるマイナーアクチノイドの処理量		
	従来の大型ADS	C-ADS
加速器の並列数	線形加速器 × 1	RCS (1.5 MW/unit) × 3 ~ 7
加速器のビームパワー	30 MW	4.5 ~ 10.5 MW
原子炉熱出力	800 MWt	200 ~ 400 MWt
マイナーアクチノイド の年間処理量	250 kg	62.5 ~ 125 kg

## 軽水炉によるMA発生量とC-ADSによるMA処理の見通し

- 1 GWeの軽水炉を1年間稼働すると20 tの使用済み燃料が発生
- 1 tの使用済み燃料の中に1 kgのMA

1 GWe クラスの軽水炉が  
30 基稼働と仮定

このほかに、日本では2014年4月時点で約17,000 tの使用済み燃料が保管中

年間600 tの使用済み燃料  
(600 kgのMA) が発生

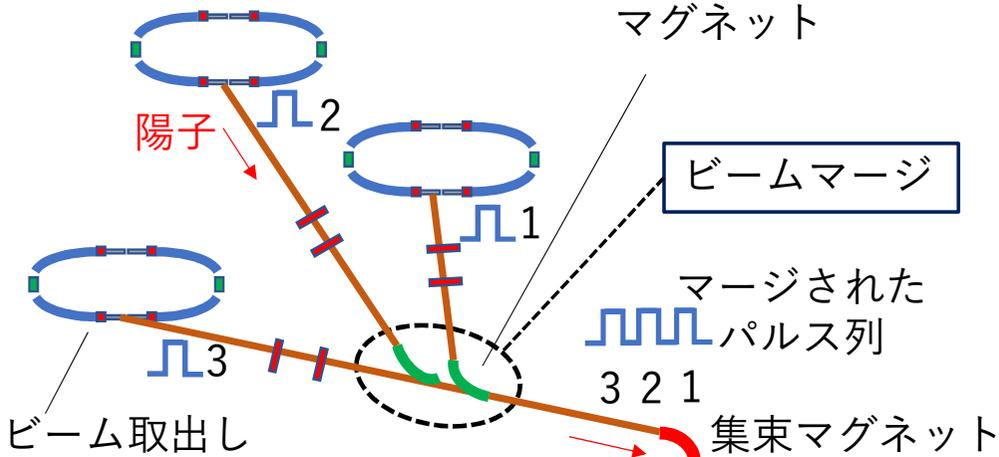
400 MWtのC-ADS 1 基により、  
年間125 kgのMAの処理が可能

C-ADS 5基で国内の軽水炉で生成されるMAが処理可能

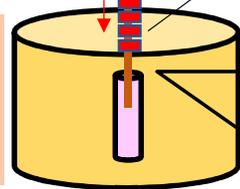
# 並列RCSによる陽子ビーム供給の概念

加速器：  
陽子を加速する装置

スイッチング  
マグネット



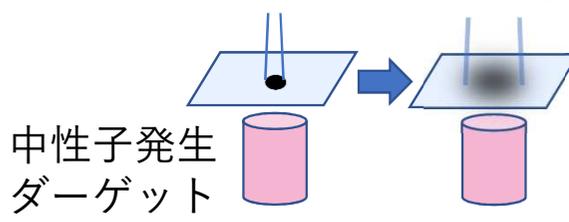
ビーム輸送系：  
加速器から原子炉までビーム  
をガイドするマグネット群



原子炉

	ビーム窓の 熱負荷低減	信頼性向上 (ビームトリップ抑制)
加速器	ビーム取出し用 マグネットの制御による ビームパルスの平坦化	高周波加速装置 単基故障時の 他機器調整による ビーム強度の安定化
ビーム 輸送系	集束マグネットの磁場 調整による ビームプロファイルの 平坦化	スイッチングマグ ネットを用いた ビームマージによる 加速器の並列化

ビームプロファイルの平坦化



ビームパルスの平坦化

