

# ADS実現を目指すJ-PARCでの基盤研究とその施設利用

(ADS概要、ADS実機技術 → **武井氏**)

- 加速器科学・技術、基礎物理の進展の中で
- ADS 技術課題と世界・日本の研究状況
- J-PARCでの研究計画の新しい流れ
- 分野横断の協力、施設利用例

2012/9/29 2012年度RCNP研究会 RCNP加速器増強と核破砕反応中性子利用

東京大学 素粒子物理国際研究センター  
山下 了

**謝辞:** J-PARCでのADS施設計画等、多くのスライドは  
J-PARCセンター核変換セクション **辻本和文**氏から頂きました

## 核変換実験施設について



J-PARCセンター・核変換セクション  
辻本 和文

平成24年4月24日 第3回J-PARC評価部会資料

## 私見でのコメント

今こそ基礎を堅め、研究を進展させ、可能性を伸ばすことが必要

マイナーアクチノイドの分離消滅

+

プルトニウムの消費・変換処理

未臨界原子力利用

多様な可能性を(透明性、安全性の元に)伸ばす

× 高速炉 vs ADS

△ 高速炉だけ △ ADSだけ

◎ 高速炉 & ADS (もし他あればそれも)

急務 : 分野横断と人材育成  
学生、若手研究者の挑戦意欲

技術の共同研究  
施設の供用  
人材交流

# 計画の概要：核変換実験施設

MA装荷体系の炉物理特性及び未臨界炉心の炉物理的性質を探る

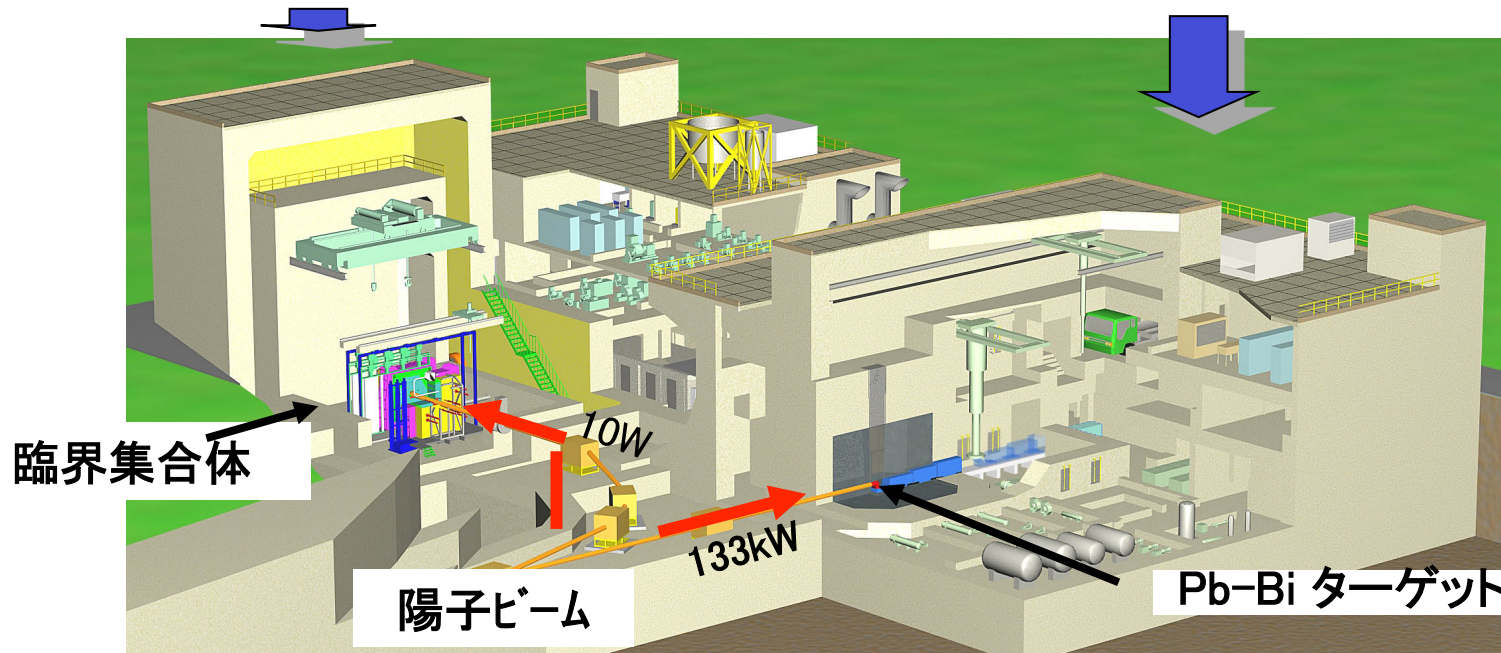
**核変換物理実験施設**  
TEF-P

施設区分：原子炉(臨界実験施設)  
陽子ビーム：400MeV(600MeV)、10W  
熱出力：500W以下

ADSビーム窓用材料の研究開発と核破砕ターゲットの技術開発

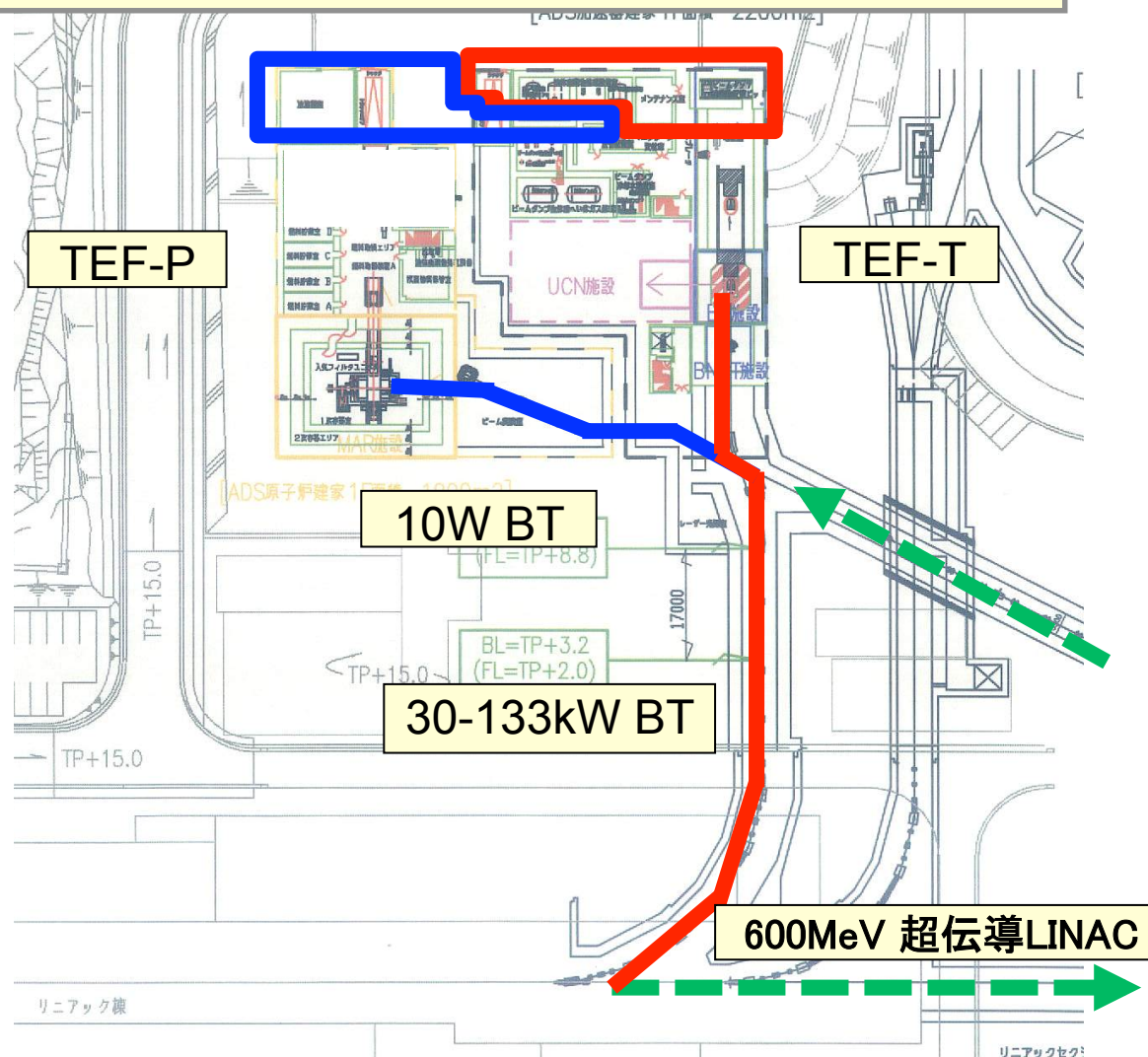
**ADSターゲット試験施設**  
TEF-T

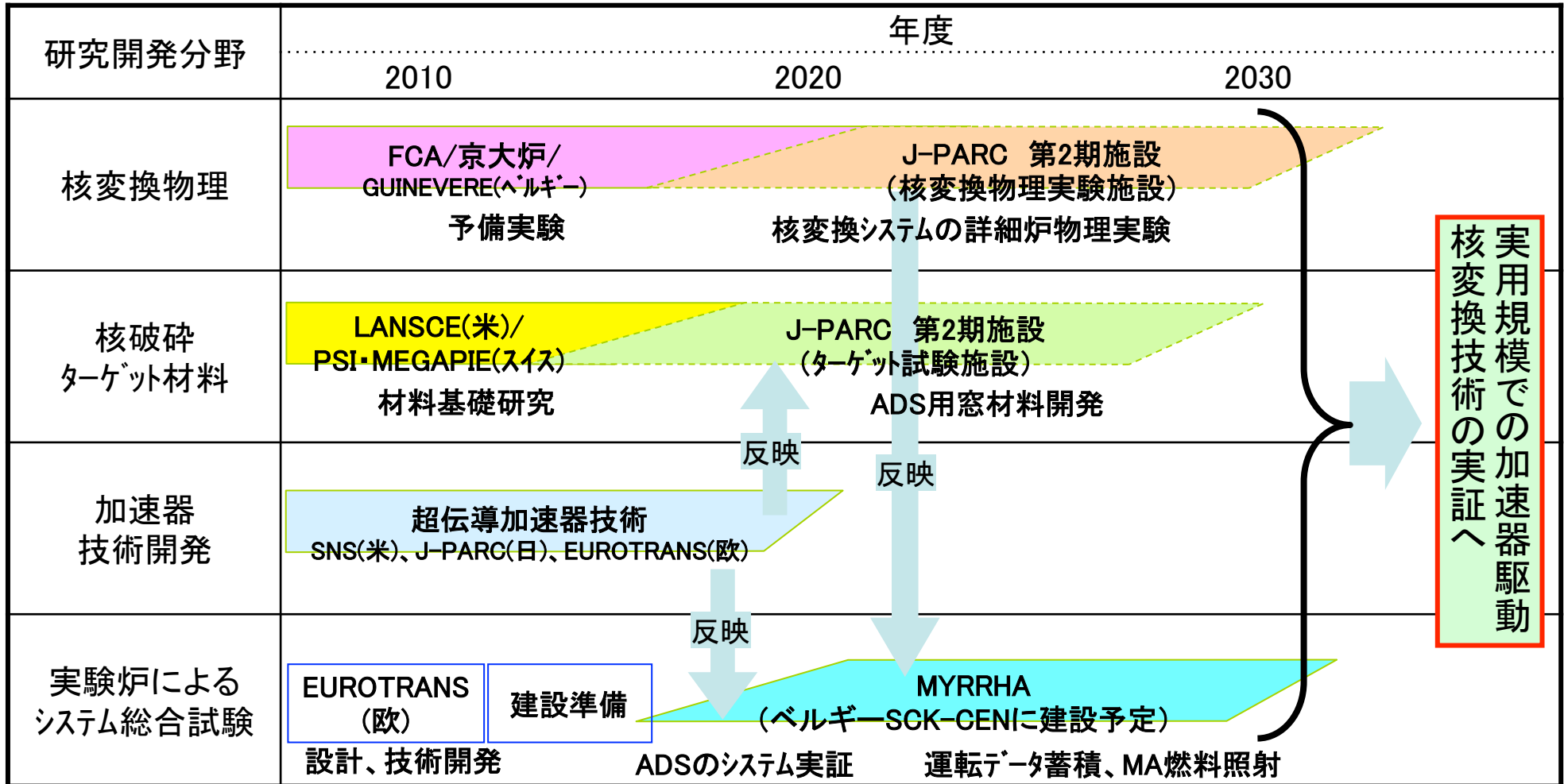
施設区分：放射線発生装置  
陽子ビーム：400MeV、133kW  
ターゲット材料：鉛・ビスマス

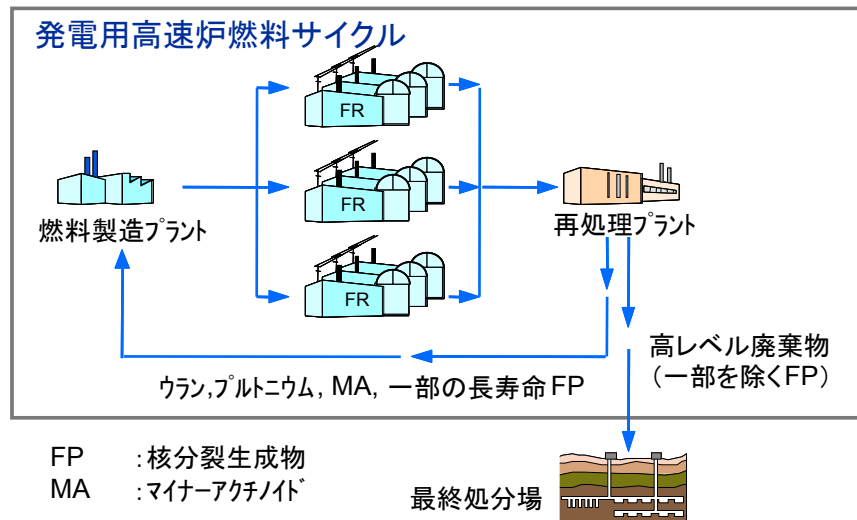


- 前期: ビーム輸送系(400MeV, 30~133kWビーム)、ADSターゲット試験施設(TEF-T)
- 後期: レーザー荷電変換装置、核変換物理実験施設(TEF-P)

- **ADSターゲット試験施設(TEF-T)**を先行して建設
  - ターゲットは可変(固体・液体鉛ビスマス)。ADSビーム窓材料照射試験を実施。
  - 多目的陽子・中性子利用施設として、RI製造、物理学実験等も可能。
- TEF-T建設後に、**核変換物理実験施設(TEF-P)**を建設
  - MA燃料装荷可能な施設として、核変換システムの核特性の研究を実施。
  - レーザー荷電変換でTEF-Pで使う10Wビームを取り出し。

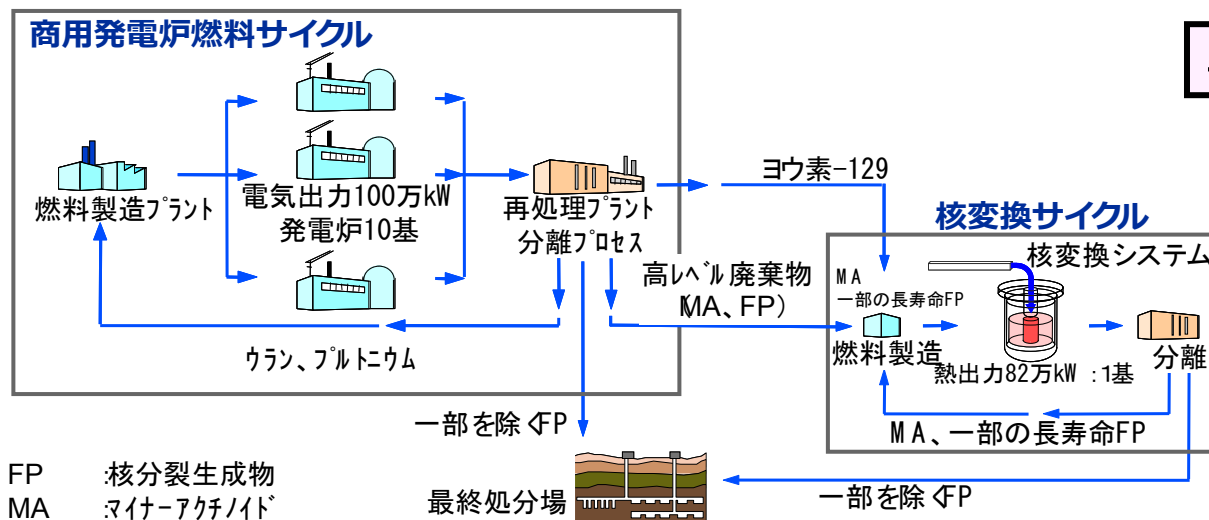






## 高速炉サイクル利用型

- ・発電炉を用いた分離変換技術。
- ・次世代再処理プラントでウランやプルトニウムと共にマイナーアクチノイドもリサイクル。
- ・核変換には発電炉(高速炉)を用いる。



## 専用サイクル型(階層型)

- ・発電用サイクルに分離プロセスと核変換サイクルを付設。
- ・核変換には専用システム(加速器駆動炉:ADS)を用いる。
- ・コンパクトな核変換サイクルにマイナーアクチノイドを閉じ込める。

# 分離変換技術の目指すところ

## 分離変換技術:

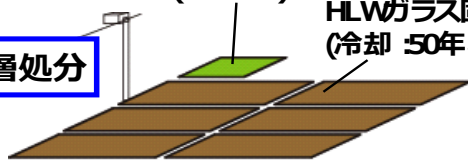
放射性廃棄物処理・処分の負担軽減及び資源の有効利用のために、高レベル放射性廃棄物に含まれる元素や放射性核種を、その半減期や利用目的に応じて分離するとともに、長寿命核種を短寿命核種あるいは安定な核種に変換する技術

45GWd/tの使用済み燃料32,000tHMで規格化

TRU廃棄物(0.13km<sup>2</sup>)

HLWガラス固化体 4万本  
(冷却:50年、面積:1.8km<sup>2</sup>)

### 従来の地層処分



### 分離変換導入

MAの核変換とSr-Csの100~130年後の分別廃棄で、処分場面積を約1/4に

Sr-Cs焼成体 5,100本  
(冷却:130年、面積:0.23km<sup>2</sup>)

MA核変換は超長期の潜在的有害度削減と長期発熱核種(Am-241)の除去に有効

高含有ガラス固化体 8,300本  
(冷却:5年、面積:0.18km<sup>2</sup>)

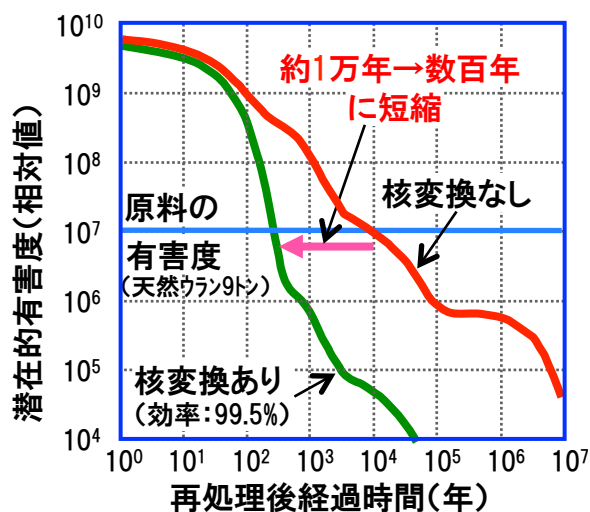
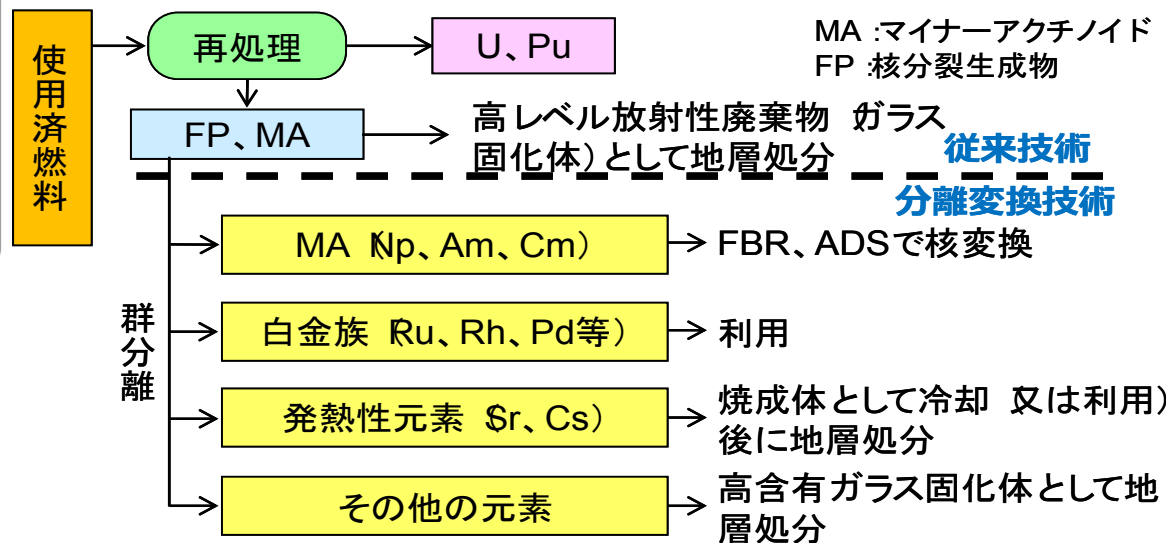
### さらに長期貯蔵

Sr-Cs焼成体 5,100本  
(冷却320年、面積:0.005km<sup>2</sup>)

高含有ガラス固化体 8,300本  
(冷却:45年、面積:0.01km<sup>2</sup>)

Sr-Csに300年程度の長期貯蔵を適用することで、全てTRU廃棄物相当の廃棄体とでき、処分場面積を約1/100に

分離変換及び長期貯蔵の組み合わせによる処分場面積の低減



核変換による潜在的有害度低減効果

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

### 分離変換の意義

- 廃棄物処分に係る物理的・時間的負担を大幅に軽減できる可能性を有する。
- 廃棄物処分体系の設計における自由度の増大。



技術

社会

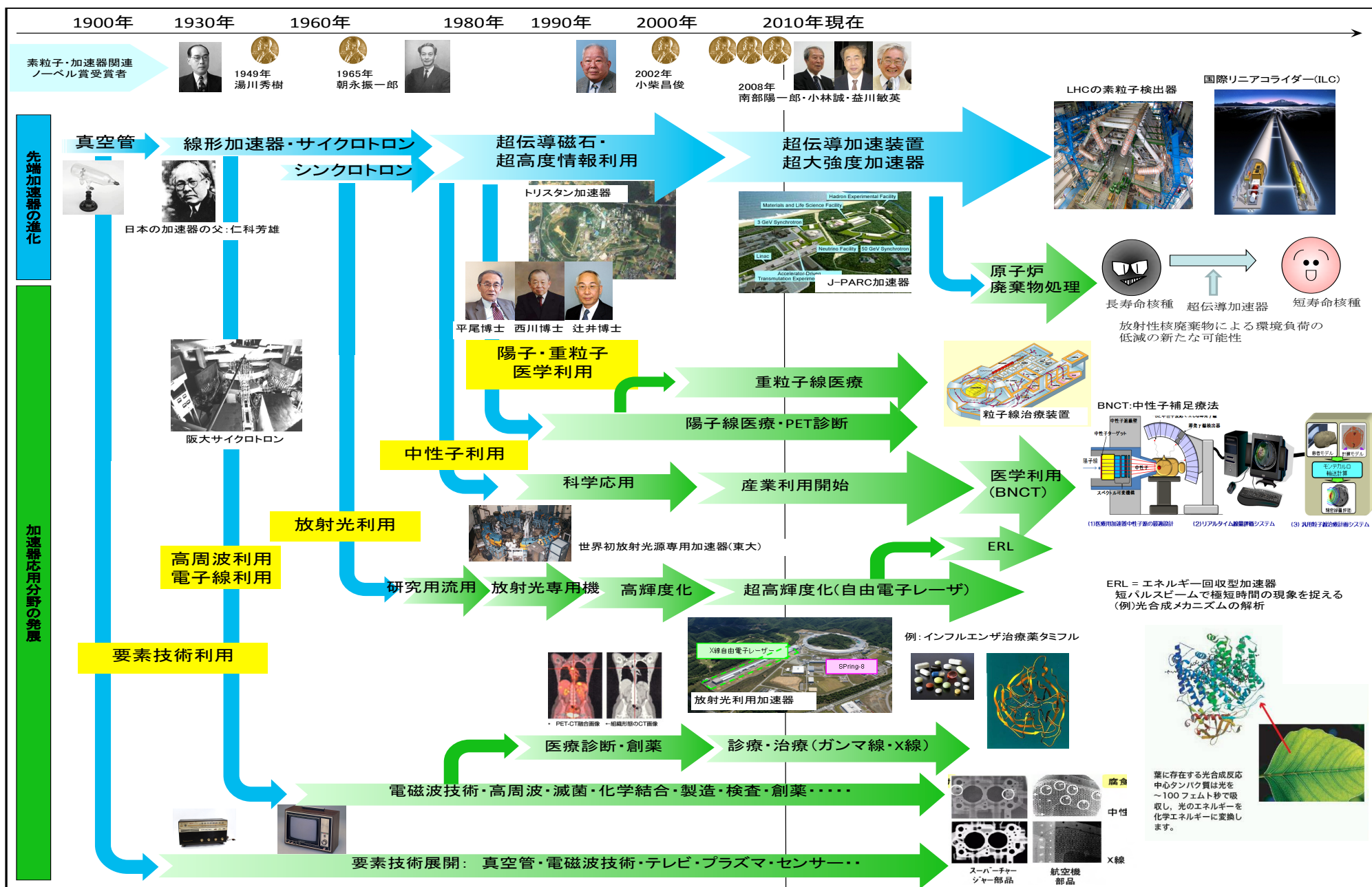
人材

産業界

世界

政策

# 先端加速器の進化と応用分野の発展



# 加速器科学・技術の追究から拓かれる新しい世界

## 宇宙・物質・生命

人類が古代から抱く根本的な謎への挑戦

宇宙の創成と未来の究明  
宇宙のダークマターの解明  
重力、真空の本質の解明

新素粒子の発見  
新物理法則の発見  
時空の構造の探求

生きた細胞の活動を原子レベルで見る  
DNAや生体たんぱく質の構造の解明  
生体触媒・酵素の発現機構の解明

## 医療・新素材・情報・エネルギー・環境

—人々の生活を革新させる技術の創出を目指して—

細胞内タンパク・特効薬の機能分析と創薬

超高速記憶スイッチデバイスの開発

小型・強力・低エネルギー消費型加速器

安心・高効率の機械の開発

新磁性材料・ナノデバイスの開発  
新しい界面の機能性材料・新触媒の創出

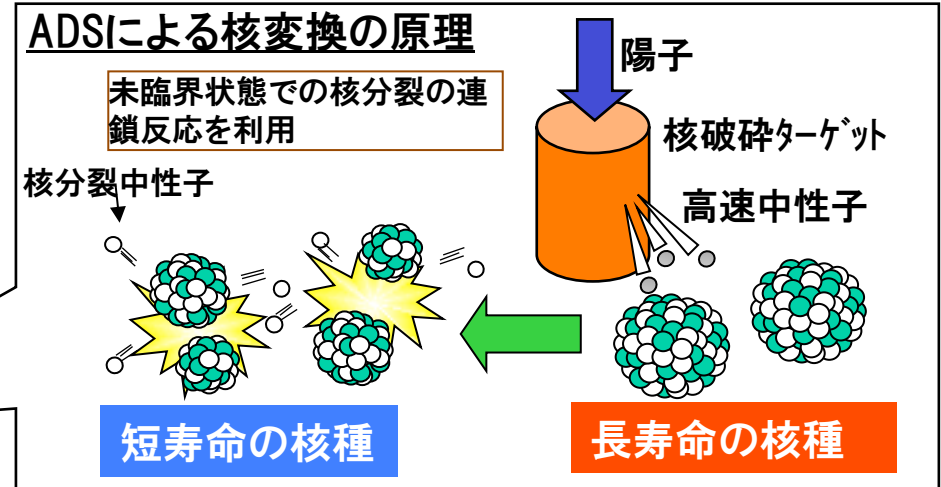
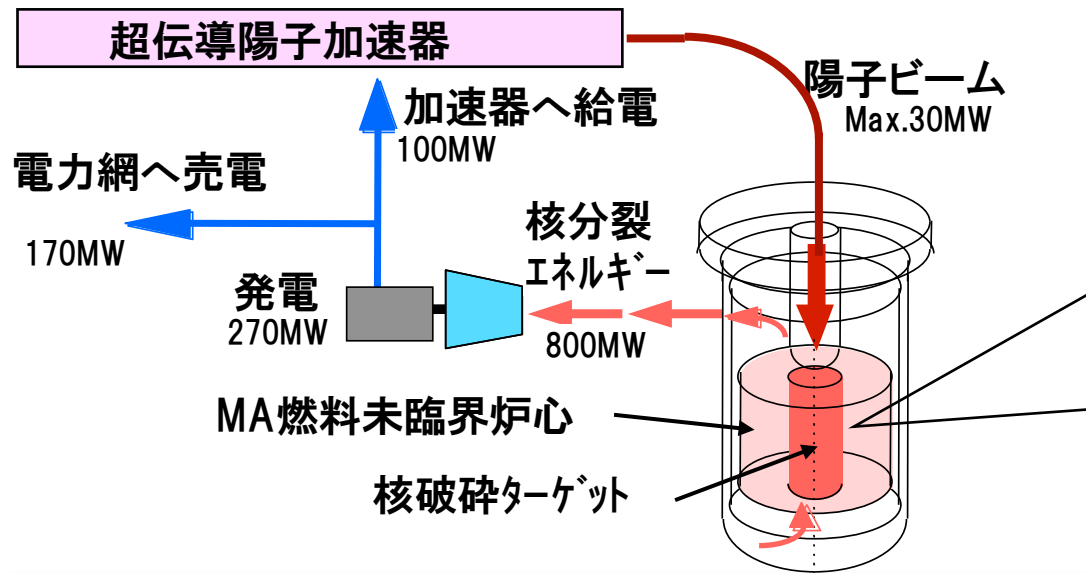
加速器駆動型・核廃棄物処理への道

燃料電池・リチウム電池・新エネルギー

超高速・高効率の情報・計算システム



# 加速器駆動核変換システム(ADS)

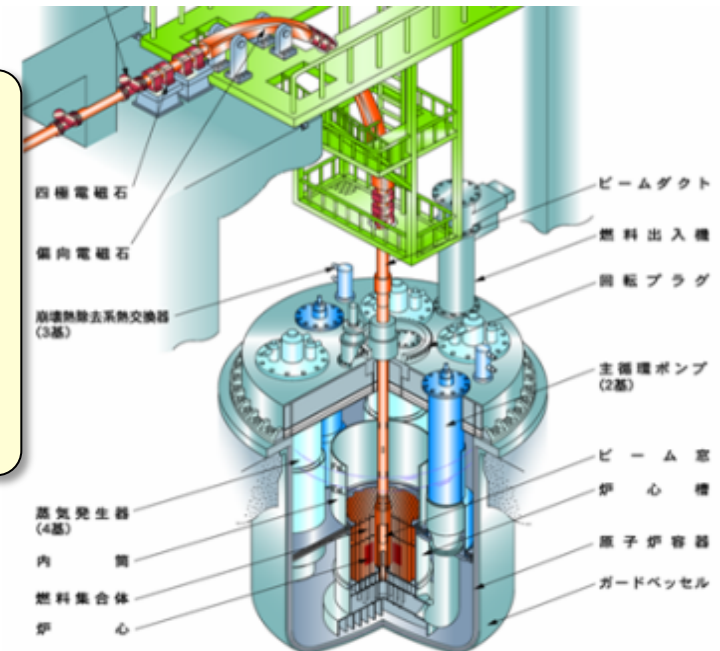


## ADSの仕組み:

- ・超伝導加速器で大強度の陽子を高効率で加速。
- ・陽子は鉛・ビスマス(Pb-Bi)に入射し、核破砕反応で大量の中性子を発生。
- ・Pb-Biは核破砕ターゲットと炉心冷却材を兼ねる。
- ・燃料の主成分はマイナーアクチノイド(MA)。
- ・中性子によりMAを核分裂反応で核変換。  
→核分裂の連鎖反応で、1個の中性子を20個に増倍しながら核変換。
- ・核分裂で発生する熱で発電し、加速器に供給。エネルギー収支は正に。

## ADSの特徴:

- ・加速器を止めれば核分裂の連鎖反応は停止 → 安全性が高い。
- ・通常の原子炉(臨界炉)でMA燃料を用いると安全上の問題が生じるが、ADSでは影響が小さいため使用可能。



## ADSの実現のために解決すべき技術課題

- ① ADSが実現する時代に発電システムに要求される安全性、信頼性、経済性といった性能目標の達成を妨げない、もしくは達成に寄与できる**加速器の性能・コスト**が実現していること
- ② **ビーム窓の工学的成立性**を確証すること
- ③ **未臨界炉心の制御等の炉物理的課題**を高い信頼度で解決すること
- ④ **Pb-Bi冷却炉の設計及び安全性**を高い信頼度で確証すること

今後は、上記の各課題に対する解あるいは解に対する技術的・経済的見込みを得る活動を着実に推進すべきである。

## 枢要課題(核変換システム)に対する取組のあり方

- 「MA核変換システムの核特性評価の信頼性を向上させるため、J-PRARC第2期の必要性・有効性についても検討すべき」
- 「核破砕中性子源と高速未臨界炉心を組み合わせた実験は世界的にも未着手で、J-PRARC等の活用に期待」

原子力委員会研究開発専門部会分離変換技術検討会  
「分離変換技術に関する研究開発の現状と進め方」(2009年4月28日)

## ① 安全性、信頼性、経済性の高いADS用加速器の実現

- 安全性、信頼性向上には、J-PARCやSNSの加速器運転経験の蓄積が重要。

## ② ビーム窓の工学的成立性の確証

- 陽子ビーム照射下での液体鉛ビスマスターゲットの運転
- 寿命評価のために液体鉛ビスマス環境下での照射データ蓄積。

## ③ 未臨界炉心の制御等の炉物理的課題の解決

- MA装荷体系の核特性予測精度検証のためのMA装荷炉物理実験。

## ④ Pb-Bi冷却炉の設計及び安全性の確証

- 基礎データを蓄積するとともに、最終的には、ある程度出力規模(MWクラス)の実験炉の運転が必要であり、実験炉級ADSの建設を計画している欧州や中国との国際協力が重要。

## ① 安全性、信頼性、経済性の高いADS用加速器の実現

- 安全性、信頼性向上には、J-PARCやSNSの加速器運転経験の蓄積が重要。

## ② ビーム窓の工学的成立性の確証

- 陽子ビーム照射下での液体鉛ビスマスターゲットの運転
- 寿命評価のために液体鉛ビスマス環境下での照射データ蓄積。

## ③ 未臨界炉心の制御等の炉物理的課題の解決

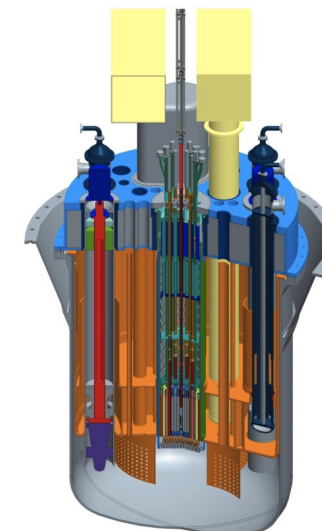
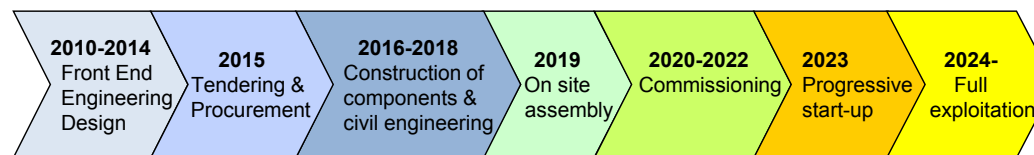
- MA装荷体系の核特性予測精度検証のためのMA装荷炉物理実験。

## ④ Pb-Bi冷却炉の設計及び安全性の確証

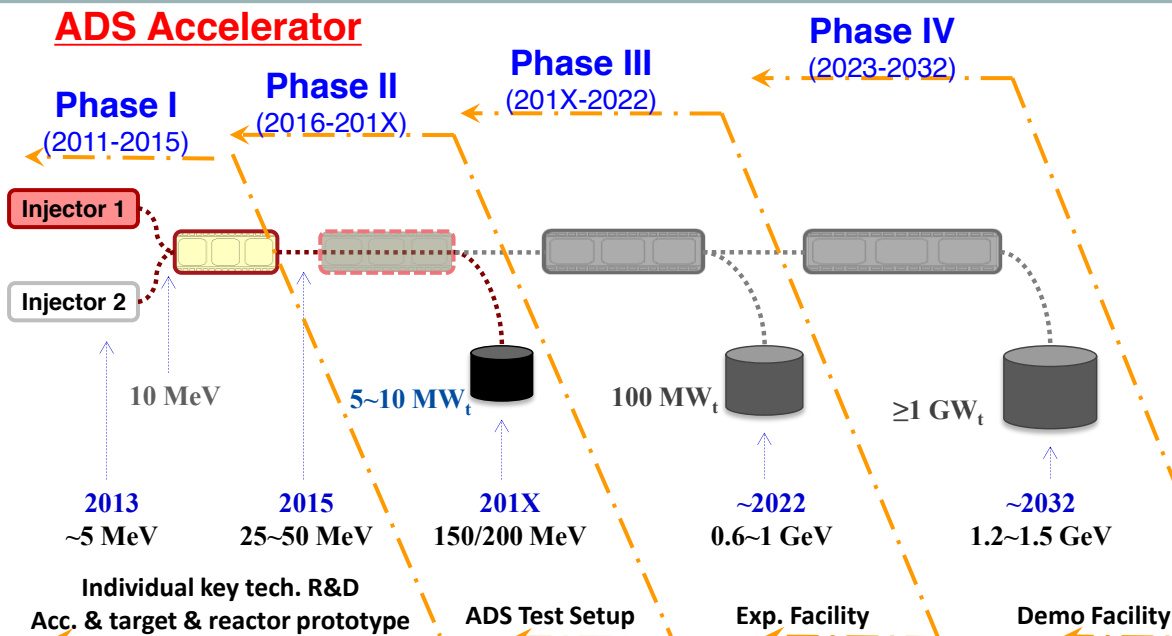
- 基礎データを蓄積するとともに、最終的には、ある程度出力規模(MWクラス)の実験炉の運転が必要であり、実験炉級ADSの建設を計画している欧州や中国との国際協力が重要。

## ベルギー-SCK・CENにおけるMYRRHA(ミラー)プロジェクト

- MYRRHAは50~100MW程度の出力を持つ多目的利用ADS(核変換実験、鉛合金高速炉開発、燃料・材料照射、RI製造等)。
- FP7(2009-)でベルギー-SCK/CENに中央設計チーム(CDT)を組織し、2015年の評価(建設の可否)に向けて、精力的に研究開発を行っている。



### ADS Accelerator



### 中国におけるADS研究開発

- 持続的な原子力エネルギーの利用のために、高速炉は燃料増殖のため、ADSは核変換のため、研究開発を進めている。
- 2032年に800MWthの原型炉を運転することを目標に研究開発を実施。
- Phase1用の資金(\$250M)及び建設用地(内陸部)を確保。



## ① 安全性、信頼性、経済性の高いADS用加速器の実現

- **安全性、信頼性向上**には、J-PARCやSNSの加速器運転経験の蓄積が重要。

## ② ビーム窓の工学的成立性の確証

- **陽子ビーム照射下での液体鉛ビスマスターゲットの運転**
- **寿命評価のために液体鉛ビスマス環境下での照射データ蓄積。**

## ③ 未臨界炉心の制御等の炉物理的課題の解決

- **MA装荷体系の核特性予測精度検証のためのMA装荷炉物理実験。**

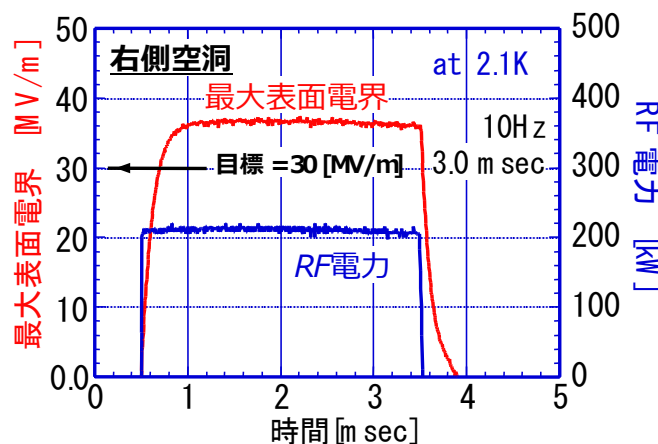
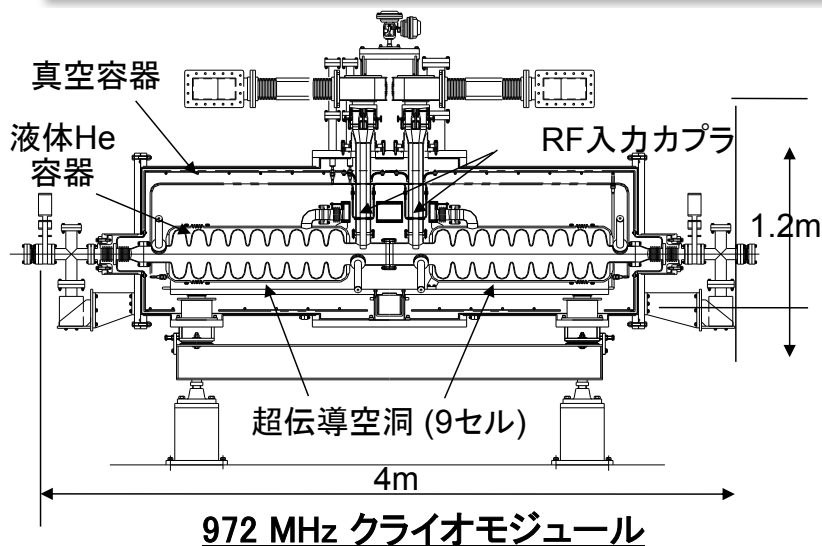
## ④ Pb-Bi冷却炉の設計及び安全性の確証

- 基礎データを蓄積するとともに、最終的には、ある程度出力規模(MWクラス)の実験炉の運転が必要であり、実験炉級ADSの建設を計画している欧州や中国との国際協力が重要。

目的: ADS用加速器に必要な高出力(30MW)、高エネルギー効率(30%以上)、高信頼性を得るための**超伝導線形加速器**の開発

研究内容:

- 超伝導線形加速器の構成要素となる**クライオモジュール**を試作し、最大表面電界(目標30MV/m)を測定
- クライオモジュール試験結果を基にADS用加速器システム全体の最適化設計を実施し、エネルギー効率、安全系としての加速器緊急停止系の検討を実施



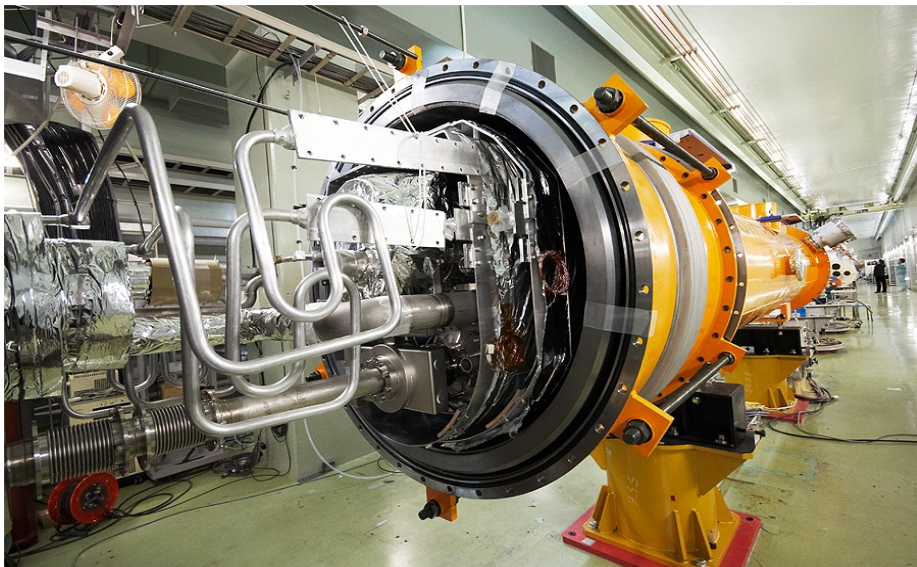
クライオモジュールの試験結果

加速器構成最適化後の所要電力

構成機器	所要電力
超伝導空洞のRF源	69.6M W
四重極電磁石	0.4M W
He冷凍機	16.5M W
100M eV 入射加速器	10.0M W
ユーティリティ	9.7M W
合計	<b>106.2MW</b> 効率 <b>28%</b>

成果と今後の課題:

- 温度**2.1K**にて**最大表面電界30MV/m以上**を記録し、高エネルギー一部の技術成立性を実証
- システム設計によりADS用加速器(1.5GeV、30MW)の全体像(エネルギー効率、配置、緊急停止系、故障頻度等)を明確化し、ADS用加速器の基本データベースを構築
- 今後、短尺化(現在は470mと推定)、低エネルギー一部の効率化、安定な加速器システム等の検討が必要



## 超伝導加速器

1.3GHz 9セル (高エネルギー、強度)

- ILC(国際リニアコライダー),
- Euro-XFEL(X線自由電子レーザー),
- ERL(エネルギー回収型放射光)

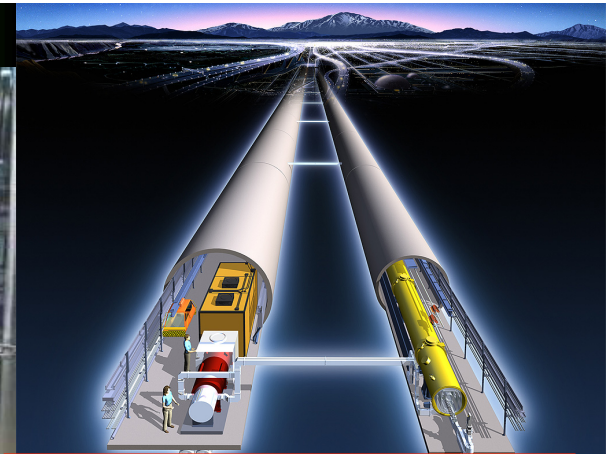
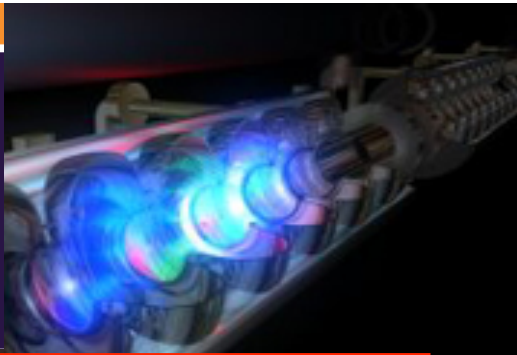
972MHz 9セル

- ADS R&D (大強度、安全性)

共通技術、共同施設、共通人材、産学共同

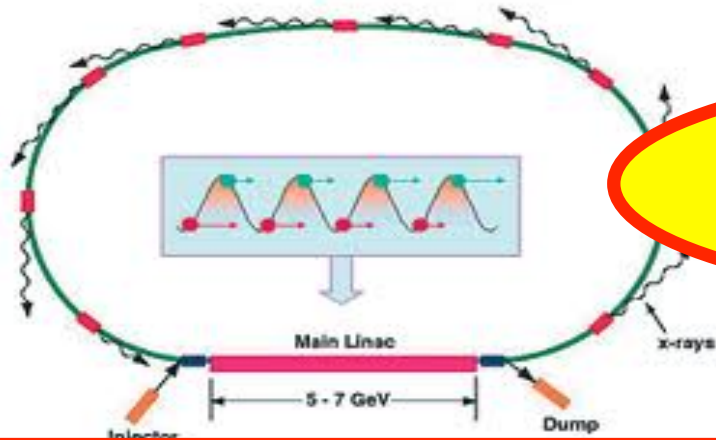
# European XFEL

Free Electron Laser (XFEL)

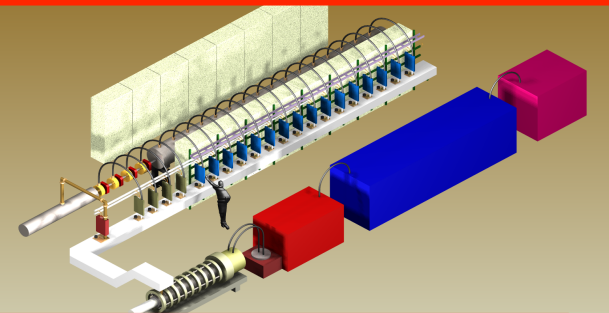


International Linear Collider (ILC)

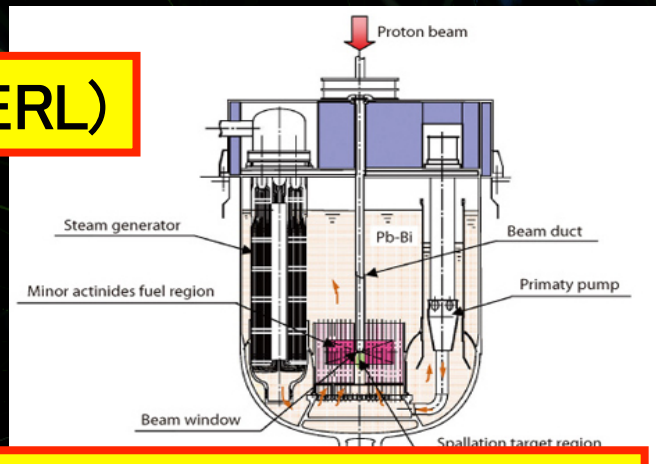
Superconducting Accelerator



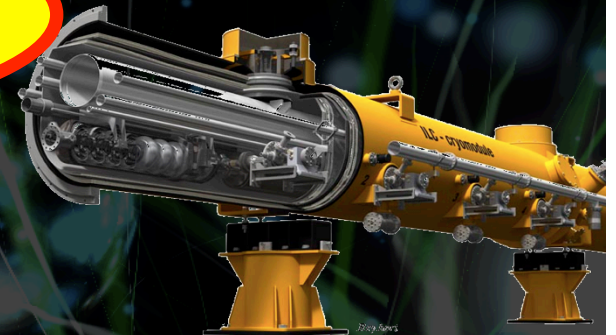
Energy Recovery LINAC (ERL)



Proton Driver ( $\nu$ ,  $n$ )



ADS Transmutation



## ① 安全性、信頼性、経済性の高いADS用加速器の実現

- 安全性、信頼性向上には、J-PRARCやSNSの加速器運転経験の蓄積が重要。

## ② ビーム窓の工学的成立性の確証

- 陽子ビーム照射下での液体鉛ビスマスターゲットの運転
- 寿命評価のために液体鉛ビスマス環境下での照射データ蓄積。

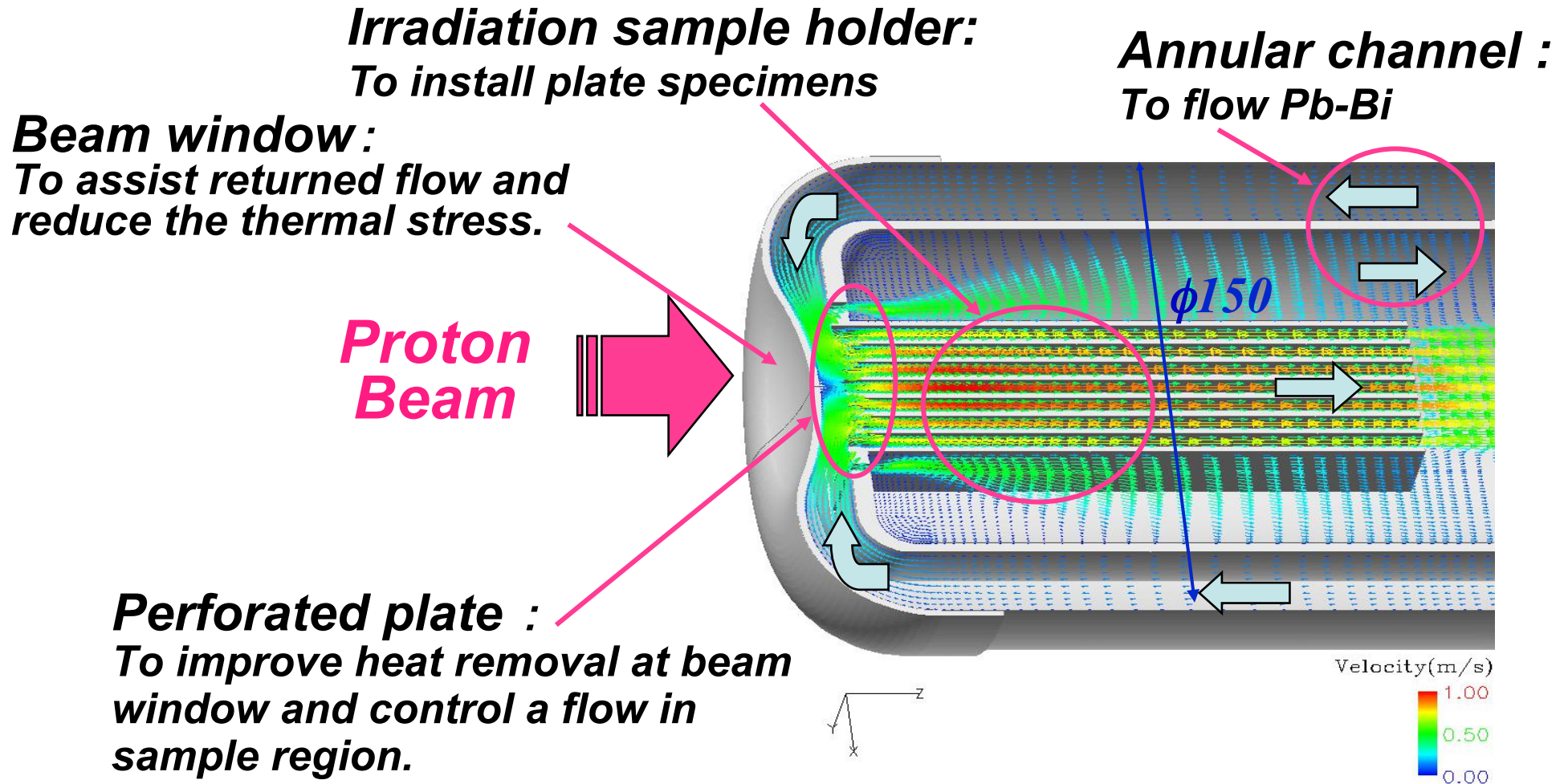
## ③ 未臨界炉心の制御等の炉物理的課題の解決

- MA装荷体系の核特性予測精度検証のためのMA装荷炉物理実験。

## ④ Pb-Bi冷却炉の設計及び安全性の確証

- 基礎データを蓄積するとともに、最終的には、ある程度出力規模(MWクラス)の実験炉の運転が必要であり、実験炉級ADSの建設を計画している欧州や中国との国際協力が重要。

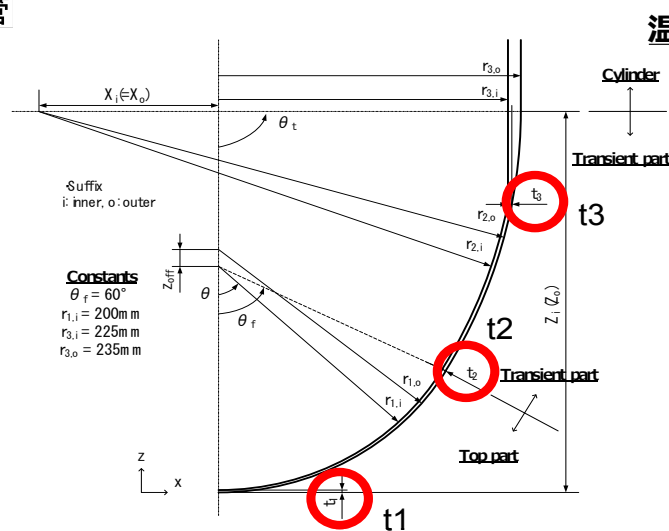
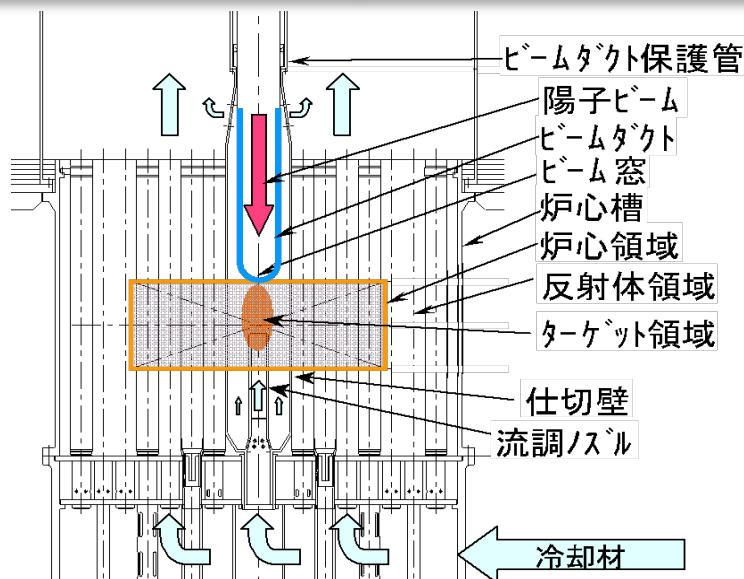
## 二重管型ターゲット概念(先端部)



目的: 陽子ビームによる発熱、熱衝撃、鉛ビスマスによる静圧、腐食、照射損傷などに耐える設計が要求される**ビーム窓**の工学的成立性を検討

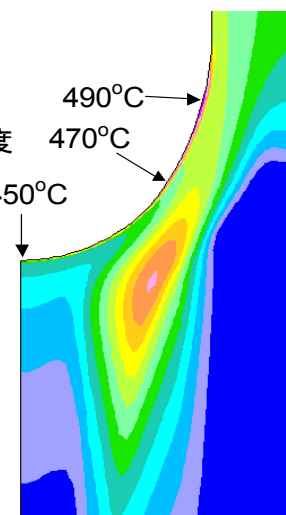
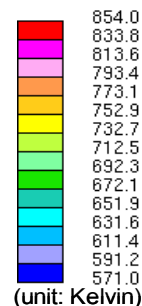
研究内容:

- 陽子ビーム照射下(1.5GeV-20mA(30MW))で、設計外圧1.0 MPaに対して安全率3を確保(最大温度500°C以下)できる構造を検討



温度分布

ビーム窓  
外表面温度



成果と今後の課題:

- ビーム窓の板厚として、2.0~3.0 mmを選定(座屈圧力3.54 MPa)。鉛ビスマスによる腐食を考慮しても非照射条件で**座屈に対する健全性が確保できる見通し**を得た
- 今後、さらに、鉛ビスマス中の腐食、熱流動、照射データの蓄積が必要 → 各種試験を実施中
- ビーム窓の寿命評価のためには、特に**照射データ(照射硬化やDBTT(延性脆性遷移温度))の蓄積が必要**

## ① 安全性、信頼性、経済性の高いADS用加速器の実現

- 安全性、信頼性向上には、J-PARCやSNSの加速器運転経験の蓄積が重要。

## ② ビーム窓の工学的成立性の確証

- 陽子ビーム照射下での液体鉛ビスマスターゲットの運転
- 寿命評価のために液体鉛ビスマ環境下での照射データ蓄積。

## ③ 未臨界炉心の制御等の炉物理的課題の解決

- MA装荷体系の核特性予測精度検証のためのMA装荷炉物理実験。

## ④ Pb-Bi冷却炉の設計及び安全性の確証

- 基礎データを蓄積するとともに、最終的には、ある程度出力規模(MWクラス)の実験炉の運転が必要であり、実験炉級ADSの建設を計画している欧州や中国との国際協力が重要。



# 計画の概要：核変換実験施設

MA装荷体系の炉物理特性及び未臨界炉心の炉物理的性質を探る

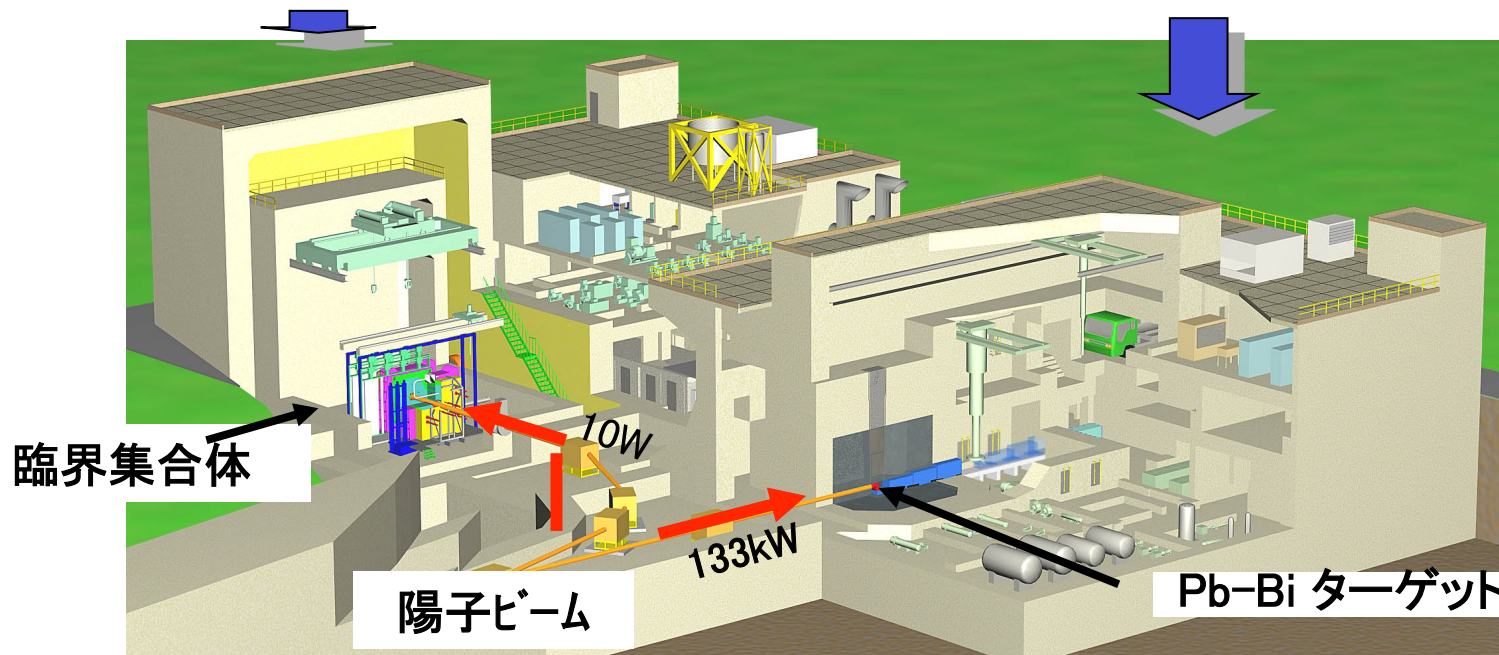
**核変換物理実験施設**  
TEF-P

施設区分：原子炉(臨界実験施設)  
陽子ビーム：400MeV(600MeV)、10W  
熱出力：500W以下

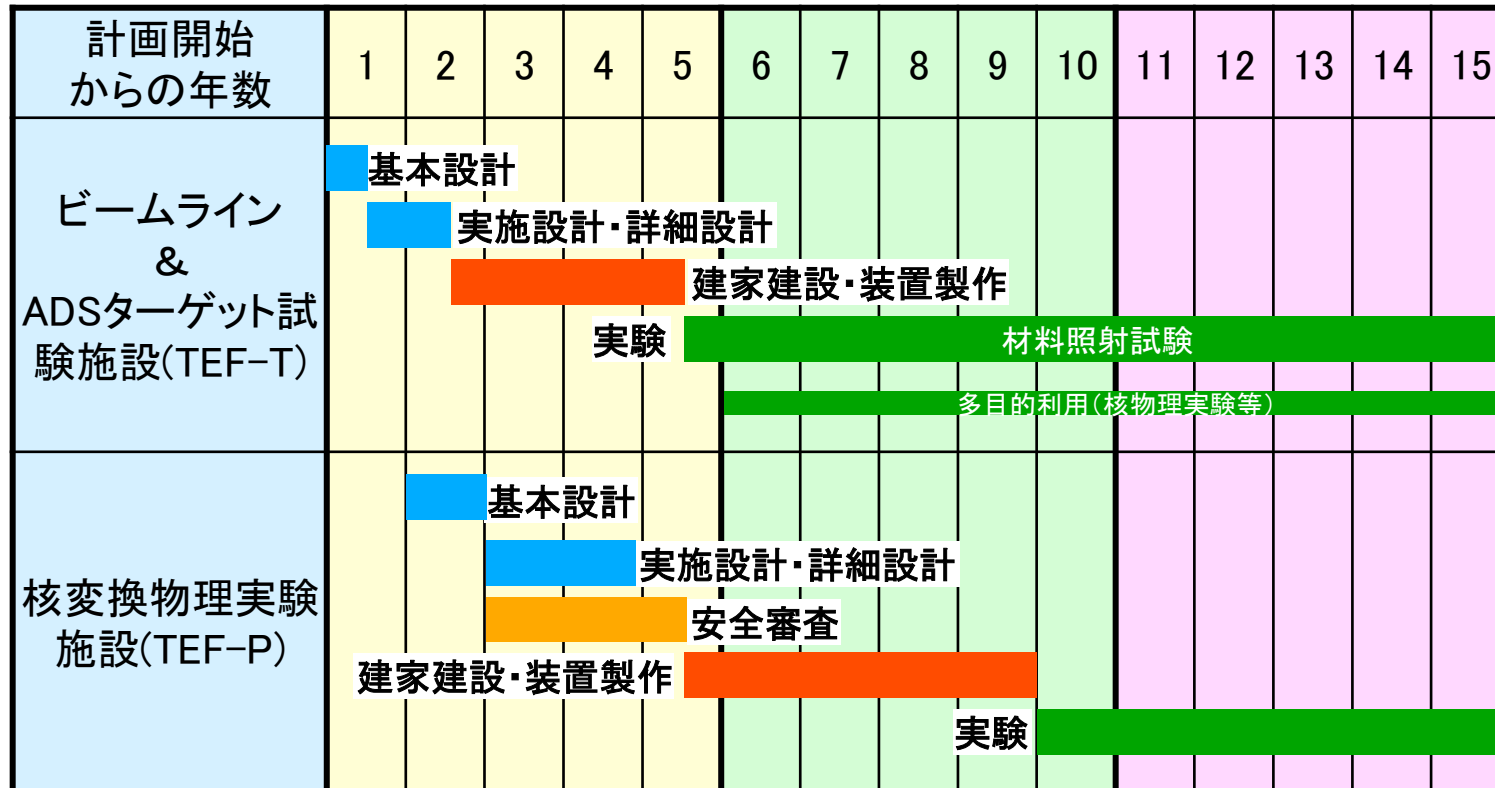
ADSビーム窓用材料の研究開発と核破砕ターゲットの技術開発

**ADSターゲット試験施設**  
TEF-T

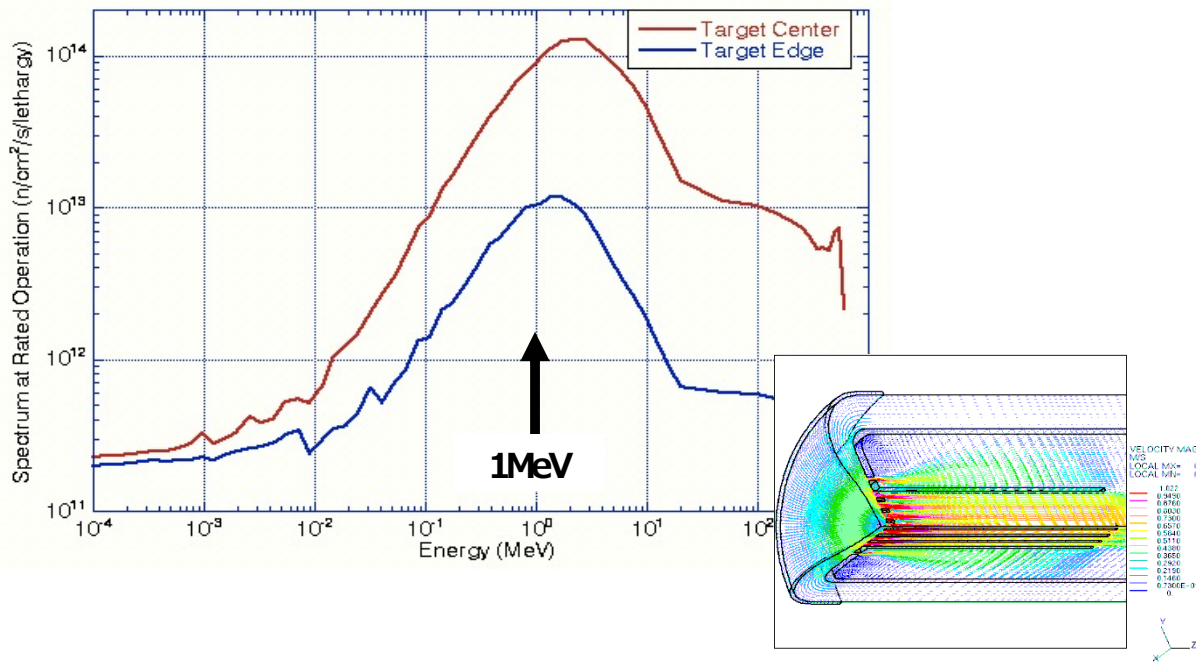
施設区分：放射線発生装置  
陽子ビーム：400MeV、133kW  
ターゲット材料：鉛・ビスマス



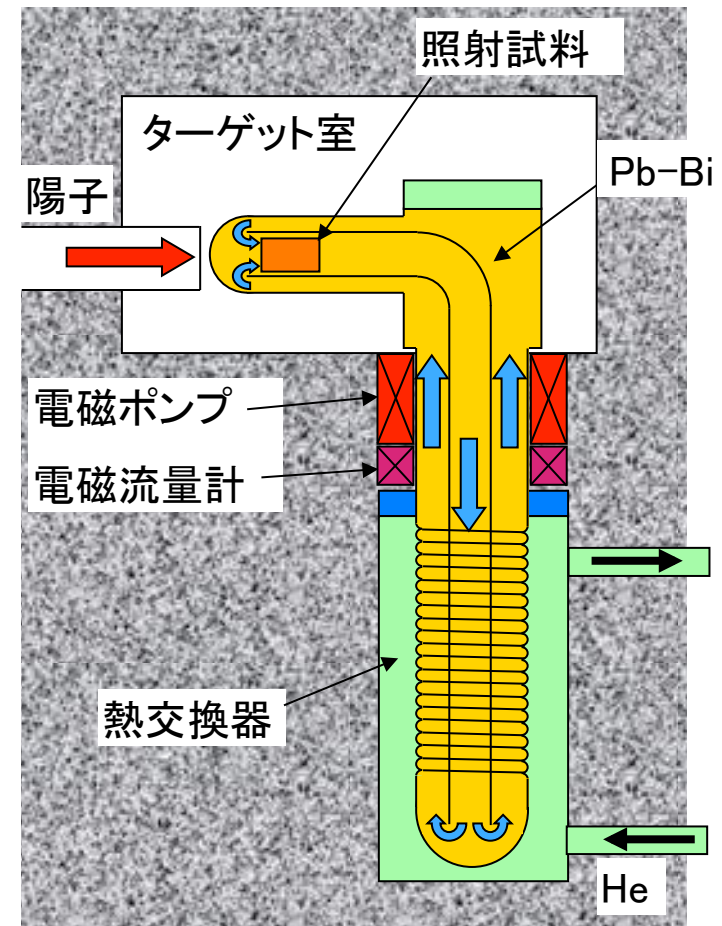
# (参考資料)核変換実験施設整備の年次展開案



- 陽子ビームと高速中性子による材料照射施設
- ADSのビーム窓候補材、FBR用構造材、核融合材料等の照射が可能
- 鉛ビスマス核破碎ターゲットの条件(温度、流速等)を変え、ADS実用化の際に必要なデータベースを構築

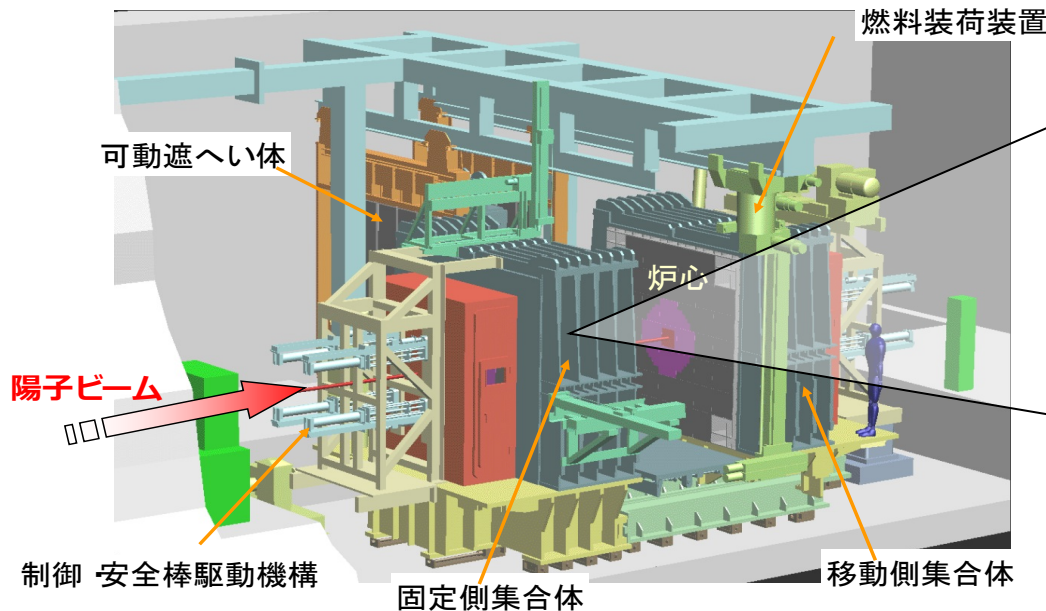
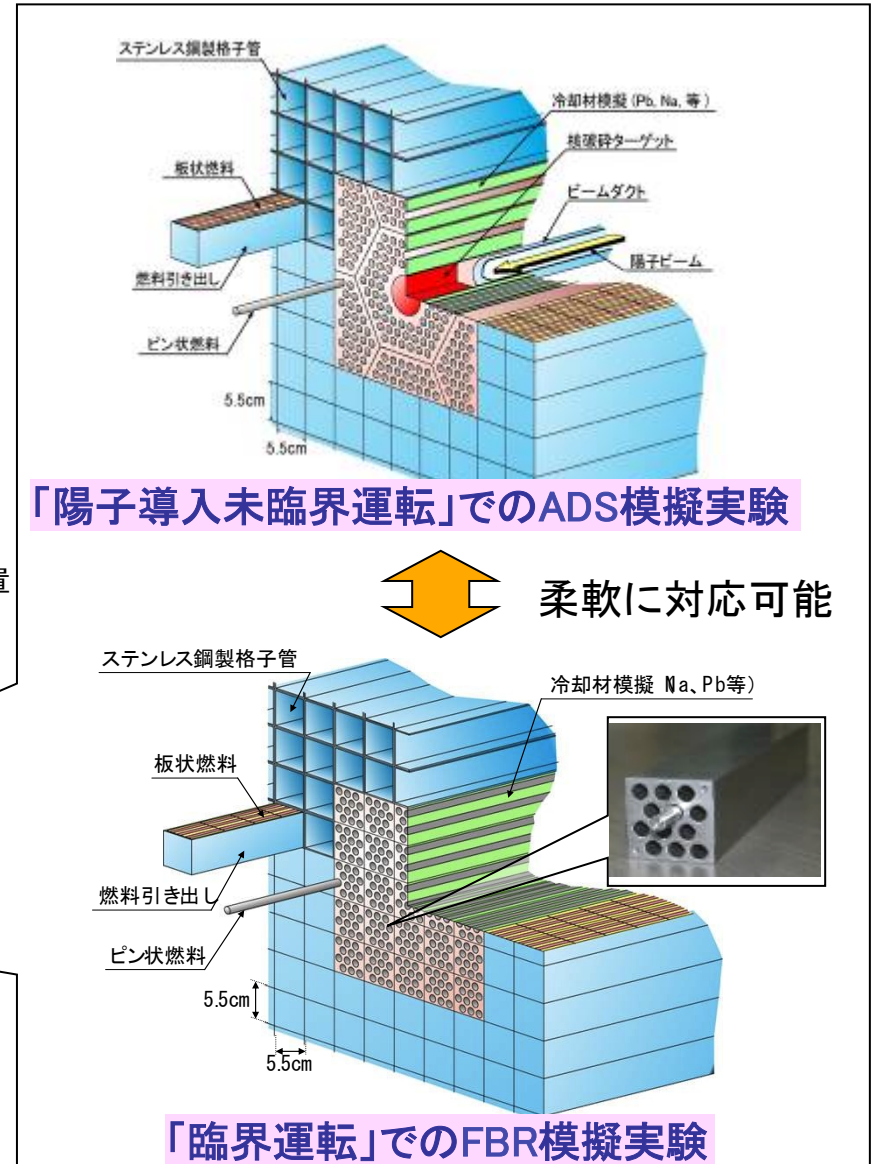


照射試験領域の中性子束のエネルギー分布



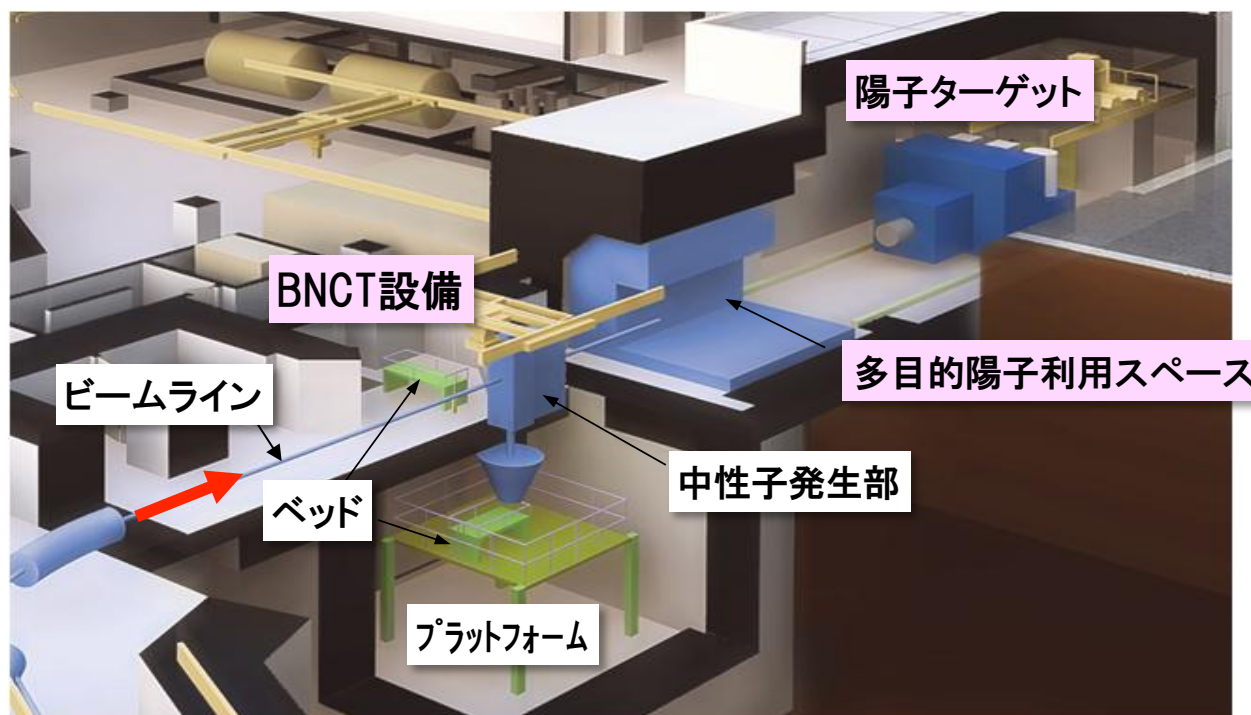
ADSターゲット試験施設で採用予定の2重管型ターゲット概念

- J-PARC第2期で建設を計画
- 既存の高速炉臨界実験装置(FCA)に準拠した設計
- 核変換に係わる炉物理・核データの研究を実施 (ADSとFBRの双方に貢献)
- 中心5×5格子管を交換可能とし、**ピン燃料装荷実験**や**高発熱試料(MAやFP)**を用いた実験に供することのできるようにする。(但し、遮蔽、冷却、遠隔操作が必要)



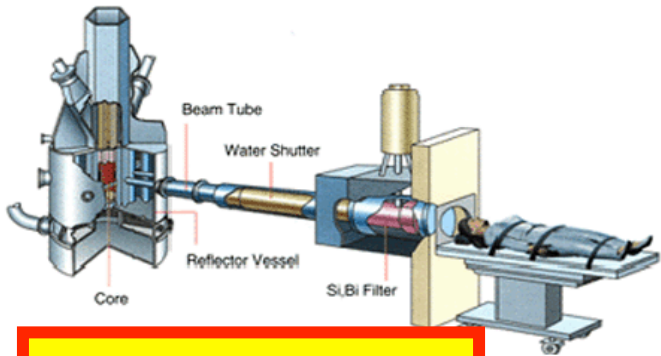
- ◆ 現状では、J-PARCには陽子照射できる施設が無い。
- ◆ 材料照射試験の他に、放射性同位元素(RI)の製造、物理学実験など、J-PARCの陽子ビームを多様な目的に利用するニーズは高い。

- ◎ 材料照射 → ADS窓材料の照射試験
- ◎ RI製造 → 我が国におけるRIの安定供給に貢献
- ◎ 物理学実験 → 超冷中性子の発生、短寿命核ビームの発生など、最先端物理学に貢献

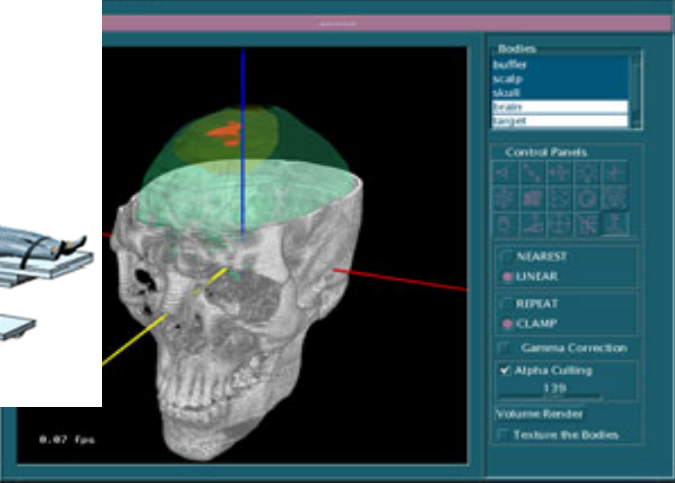


□ 陽子・中性子利用の新たな可能性が広がり、産業の活性化や新たな知の創造につながる。

ADSターゲット試験施設の多目的利用例  
(BNCT研究施設を付設した場合の検討例)



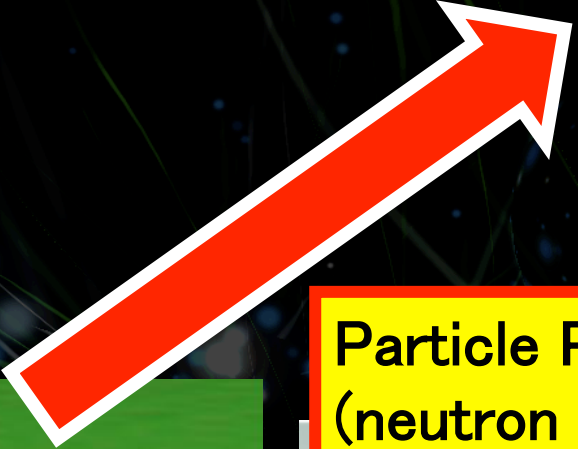
**BNCT  
Cancer therapy**



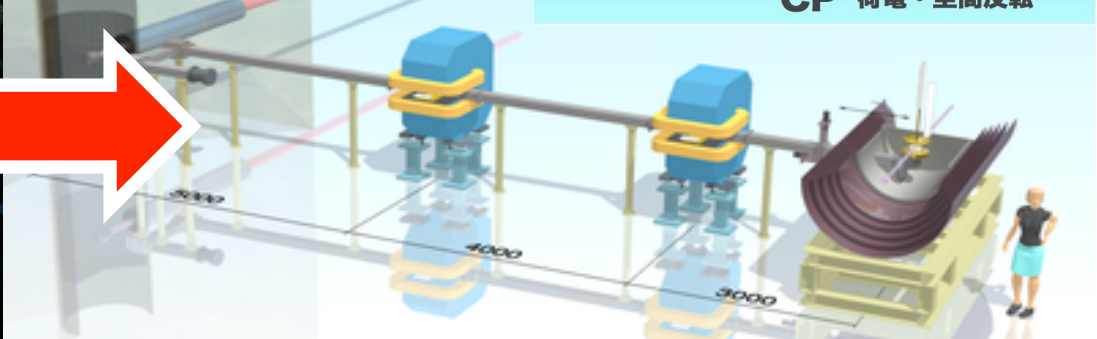
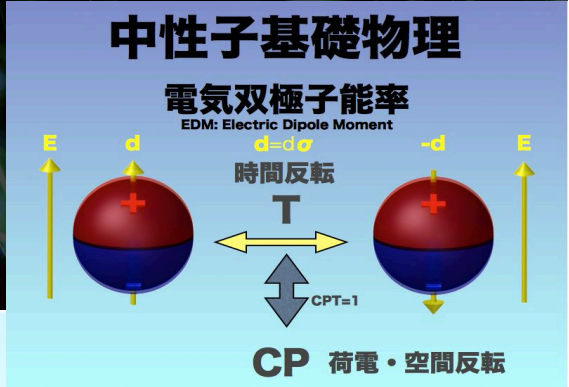
**Mo99 / Tc99 (Medical)  
Radio active source**



**ADS R&D**



**Particle Physics  
(neutron EDM)**



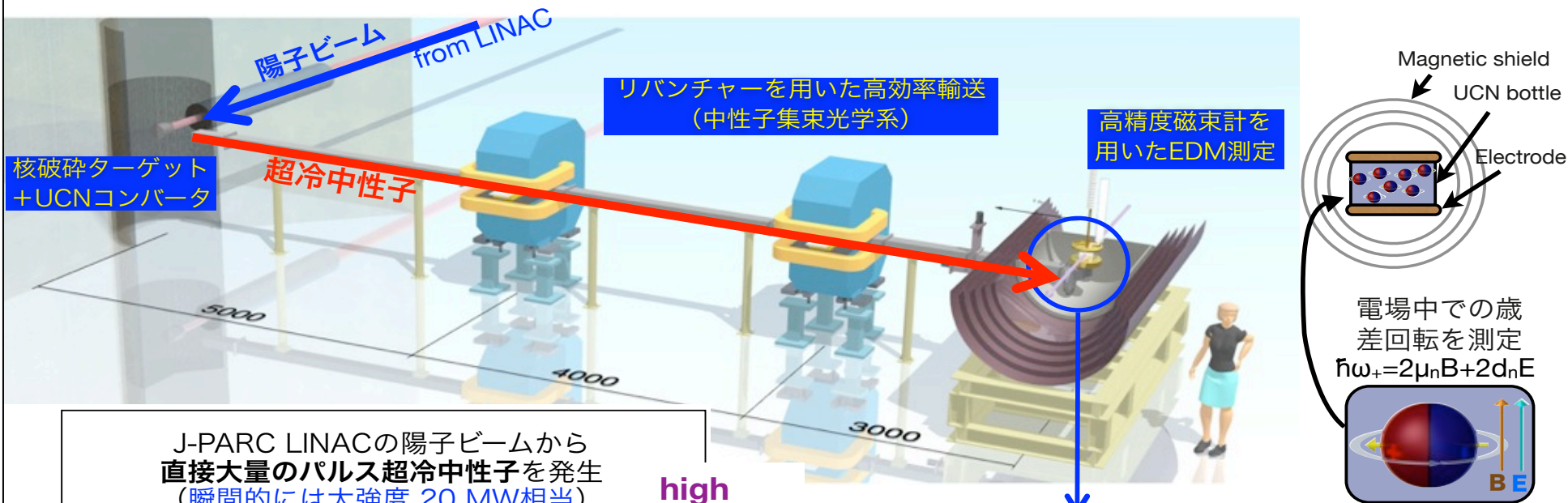
京大、東大、名大、東工大、KEK、  
 九大、東京理科大、阪大、J-PARC、理研、他

# nEDM at J-PARC 概要

超冷中性子を蓄積し、歳差回転を測定  
 現在の上限  $|d_n| < 2.9 \times 10^{-26}$  e cm (90% C.L.)  
 (Baker et al., PRL97 (2006) 131801)

系統誤差 ← 磁場均一性

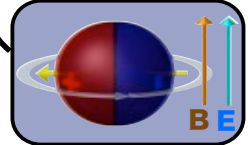
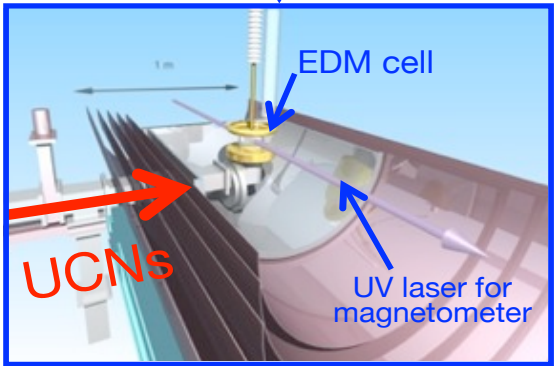
➔ 高密度UCNで系統誤差低減



J-PARC LINACの陽子ビームから  
 直接大量のパルス超冷中性子を発生  
 (瞬間的には大強度 20 MW相当)  
 +  
 高効率輸送光学系で密度を保つ  
 (中性子加減速により実験領域で再集束)  
 +  
 高精度磁束計による測定  
 (UVレーザーを用いた磁束計など)

➔  $10^{-27}$  e cm (phase1, 5 years)  
 ➔  $10^{-28}$  e cm (phase2)

high density  
 |  
 small systematic errors



若手スタッフのリーダーシップ: 北口(京大原子炉)、三島(東大)、吉岡(九大)

挑戦している多くの学生達:

今城(京大)、片山(東大)、山田(東大)、横山(東大)、  
櫻井(東京理科大)、松本(九大)、柏原(名大)、、、

## UCN輸送光学

### Rebuncher 開発

パルス超冷中性子の速度を制御し、空間的に再集束をさせることを実証

➡ 実機サイズの設計開発、RFパワー増強、周波数範囲拡大

### 中性子反射膜の開発

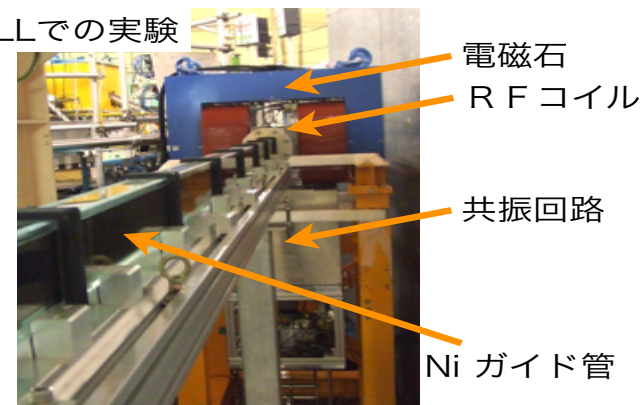
Rebuncher実験で使用したNiガイド管の、UCNに対する反射率~**99.8%**  
(10mでおおよそ85%相当)

フェルミポテンシャル**230 neV** の **DLC**の製膜に成功  
ミラーの非鏡面反射成分を解析中

➡ より透過効率のよいガイド管の作成 (10mで90%)

➡ 蓄積容器の開発 (非鏡面反射の量を制御)

ILLでの実験



DLC製膜装置と中性子ミラー

## 環境整備

### 高精度磁束計

Hg Co-magnetometer用 UVレーザーを導入、発振を確認

目標精度 100 fT

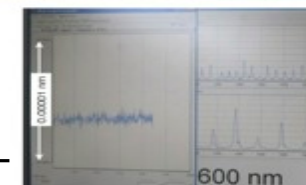
安定性 40kHz @1mW

絶対値精度 1MHz @強度変調3%

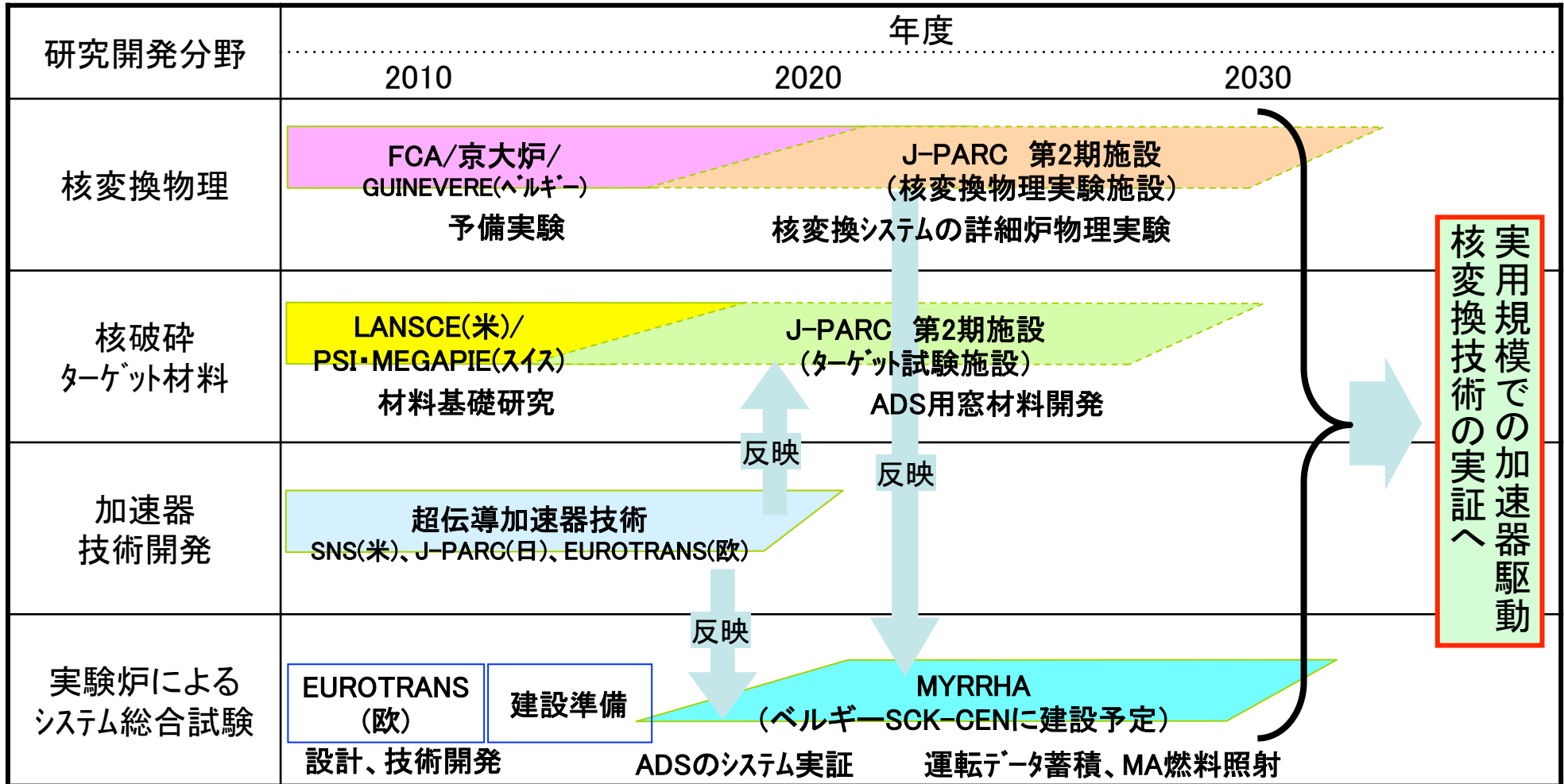
### BL05 UCN源

ドップラーシフターによりUCN生成を確認

UVレーザー







私見でのコメント (再度 まとめにあたり)

今こそ基礎を堅め、研究を進展させ、可能性を伸ばすことが必要：  
J-PARC/RCNP/、、 + 国際協力

マイナーアクチノイドの分離消滅

+

プルトニウムの消費・変換処理

未臨界原子力利用

多様な可能性を(透明性、安全性の元に)伸ばす

- × 高速炉 vs ADS
- △ 高速炉だけ △ ADSだけ
- ◎ 高速炉 & ADS (もし他あればそれも)

急務 : 分野横断と人材育成  
学生、若手研究者の挑戦意欲

技術の共同研究(超伝導加速器、材料、、産学連携)  
施設の供用(基礎物理(nEDM, 重力、、)、医療・医学、、)  
人材交流・人材育成(大学連携、分野横断、大型科研費、、)