J-PARC/ADSの計画と現状

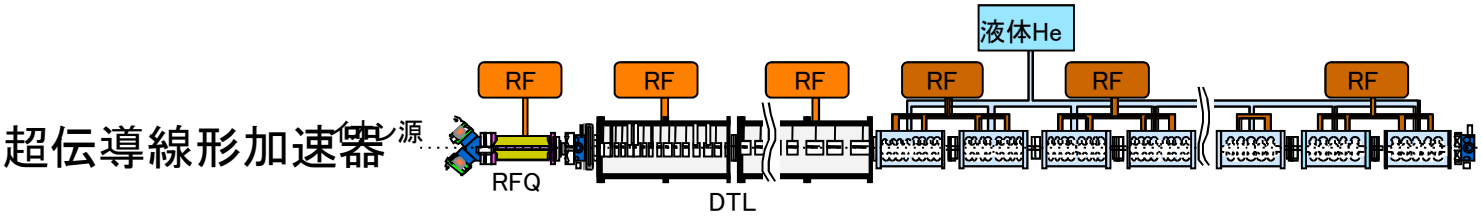
辻本 和文
原子力基礎工学研究部門核変換工学技術開発グループ
J-PARC核変換セクション
日本原子力研究開発機構

平成23年12月3日　核変換技術の展開 - 医用RI製造と核廃棄物処分 （大阪大学核物理研究センター）

講演内容

- **加速器駆動システム (Accelerator Driven System : ADS)**
  - ADSの概要
  - JAEAにおけるADSの研究開発
- **J-PARC計画**
  - J-PARC計画の概要
  - J-PARC計画におけるADS実験計画（核変換実験施設）
- **まとめ**

加速器駆動未臨界システム (Accelerator - Driven System : ADS) の概念

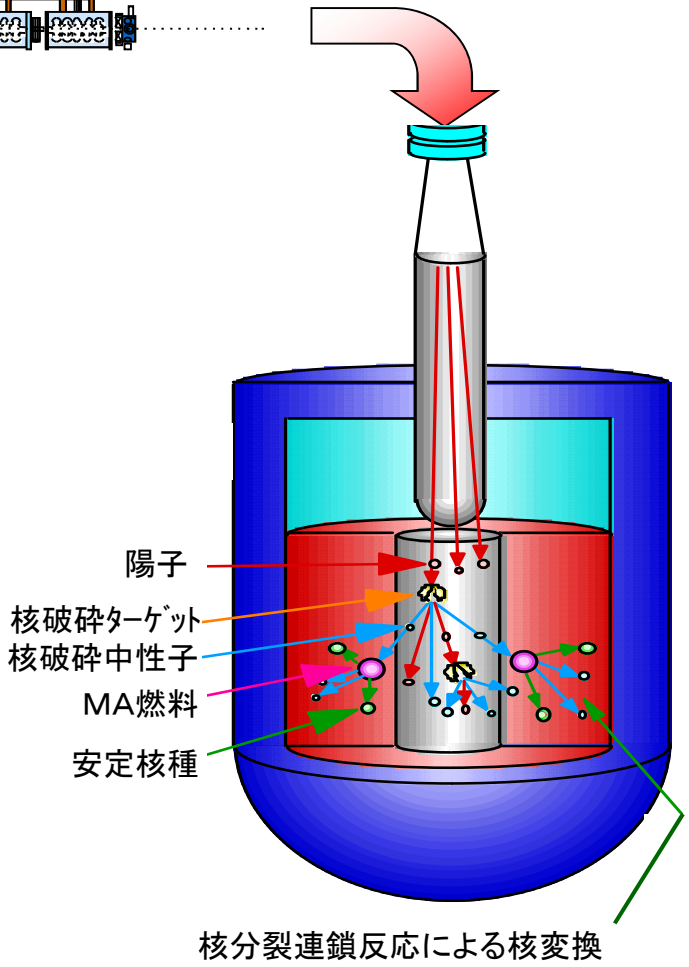


ADSの仕組み:

- **超伝導加速器**で大強度の陽子を高効率で加速。
- 陽子はﾋﾞｰﾑﾀﾞｸﾄ・ﾋﾞｰﾑ窓を通って**鉛・ﾋﾞｽﾏｽ(Pb-Bi)**に入射。
- Pb-Biは**核破砕ﾀｰｹﾞｯﾄ**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)**。
- 陽子はPb-Biとの核破砕反応で大量の中性子を発生。
- その中性子によりMAを核分裂反応で核変換。
- さらに核分裂で発生した中性子も核変換に使用。
  →核分裂の**連鎖反応**で、1個の中性子を20個に増倍。
- 核分裂で発生する熱で発電し、加速器に供給。

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。
- Pb-Biは化学的に不活性。



ADS概念図

ADSの概略仕様

- 陽子ビーム：1.5GeV
- 核破砕ターゲット：Pb-Bi
- 炉心冷却材：Pb-Bi
- 最大 k_{eff} = 0.97
- 熱出力： 800MWt
- MA初期装荷量： 2.5t
- 燃料組成 ：

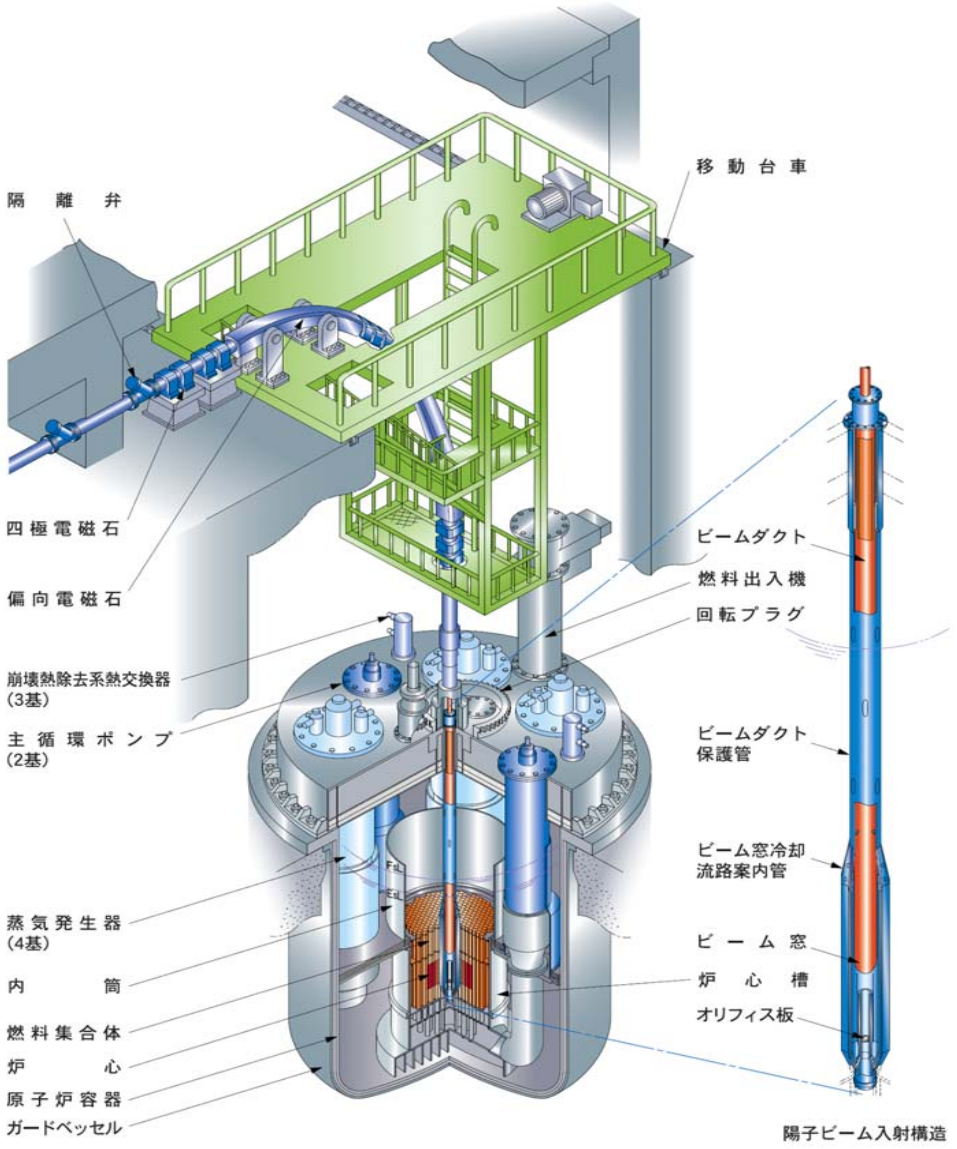
  (MA +Pu)窒化物 + ZrN

  初期組成:

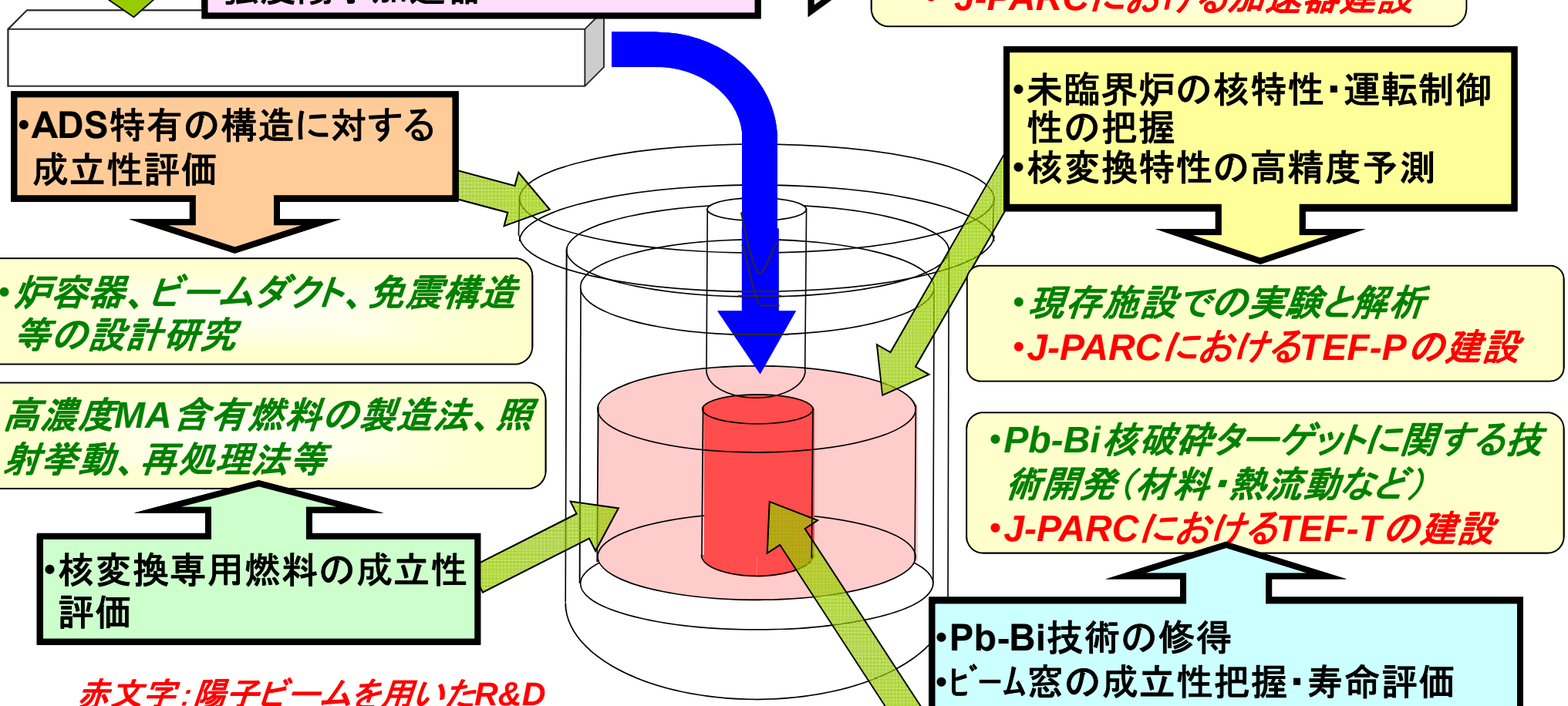
  領域-1: Pu/HM=30.0%

  領域-2: Pu/HM=48.5%
- 核変換率：

  10%MA / 年
- 燃料交換；600EFPD, 1 バッチ



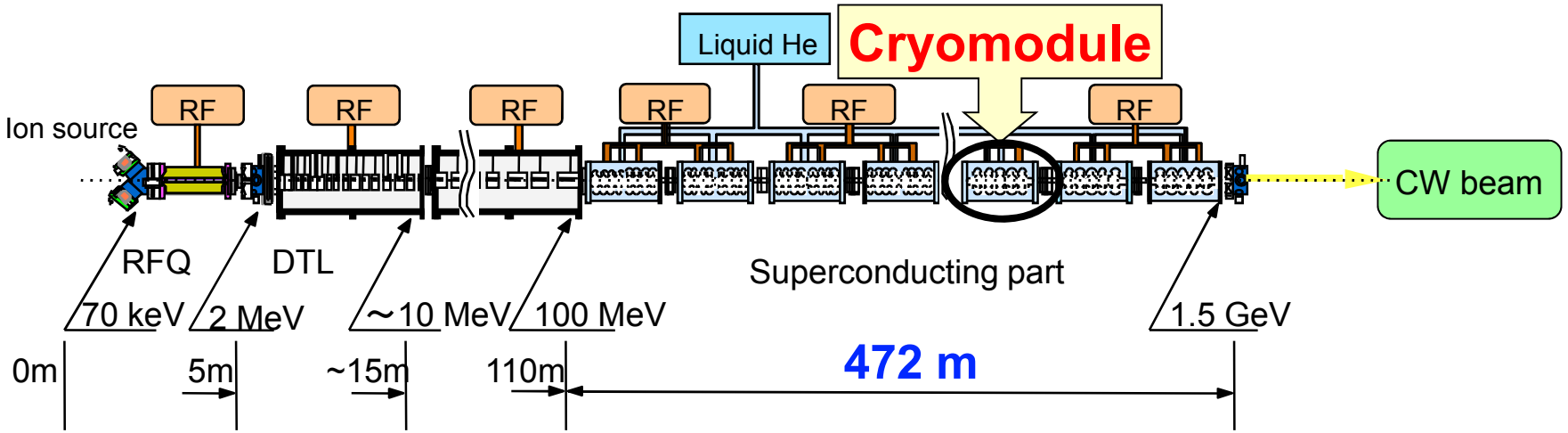
ADSの技術開発課題



赤文字：陽子ビームを用いたR&D

J-PARC	:Japan Proton Accelerator Research Complex
TEF-P	:Transmutation Physics Experimental Facility
TEF-T	:ADS Target Test Facility

ADS用超伝導加速器

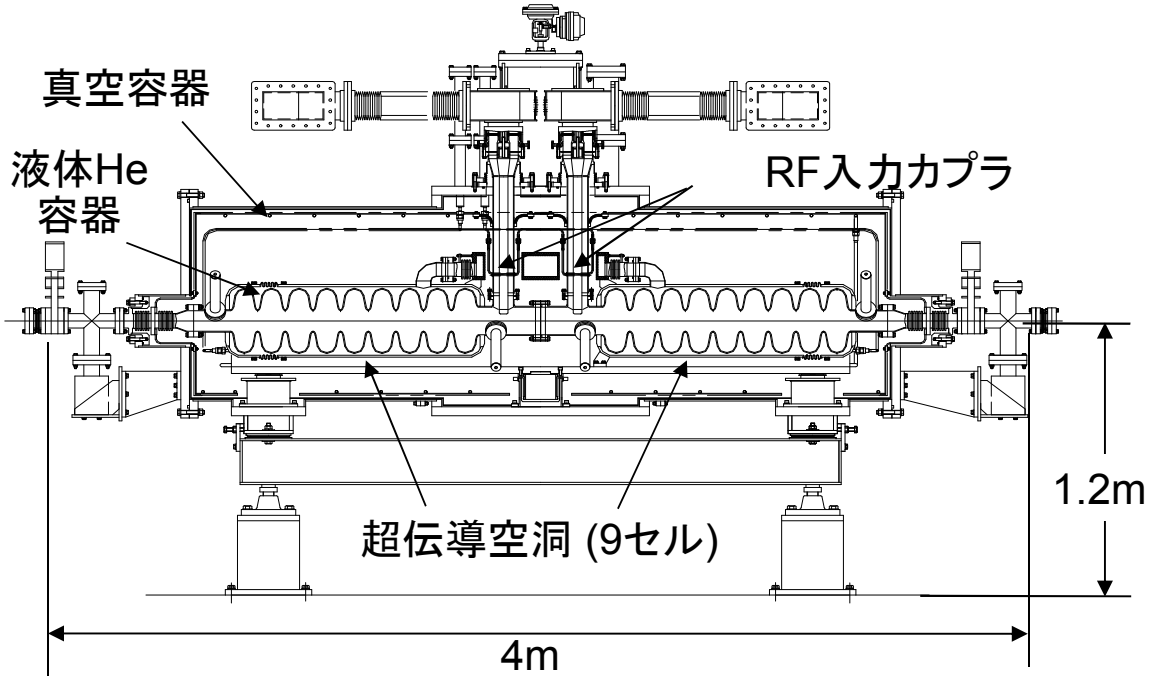


Energy consumption of SC-LINAC (1.5GeV)

Component	Electricity
RF source for SC-cavity	69.6MW
Quadra pole magnet	0.4MW
He cooling machine	16.5MW
100MeV injection accelerator	10.0MW
Utility	9.7MW
Total	106.2MW

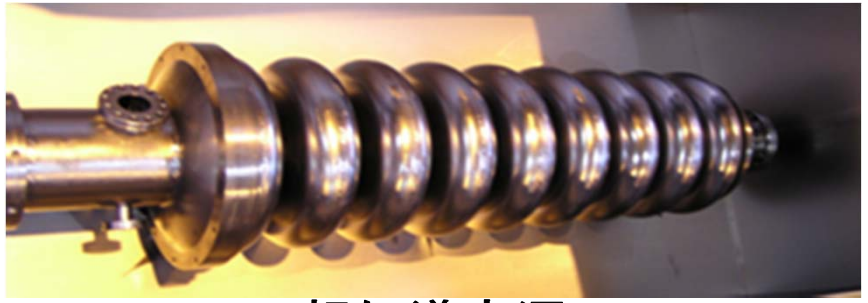
- The design study provided that the SC-LINAC consisting of 89 cryomodules and the length (100MeV to 1.5 GeV) was estimated as 472m.
- 106MW will be necessary for 30MW proton beam, i.e., acceleration efficiency will be about 28%.

ADS用加速器の研究開発

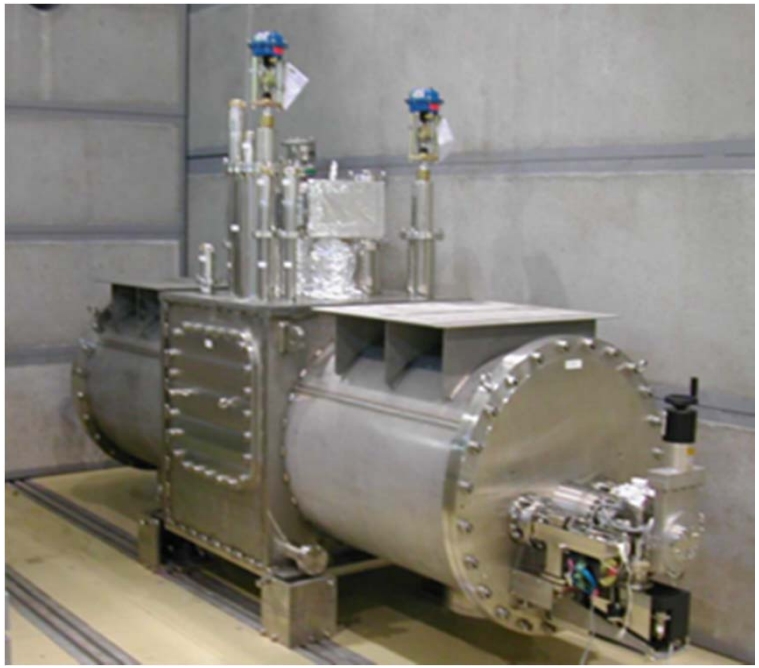


972 MHz クライオモジュール

9セル , β=0.725
He容器 : Ti (2K)
目標:最大表面電界 > 30 MV/m
試験結果: 右側→**37MV/m**
左側→**35MV/m**



超伝導空洞

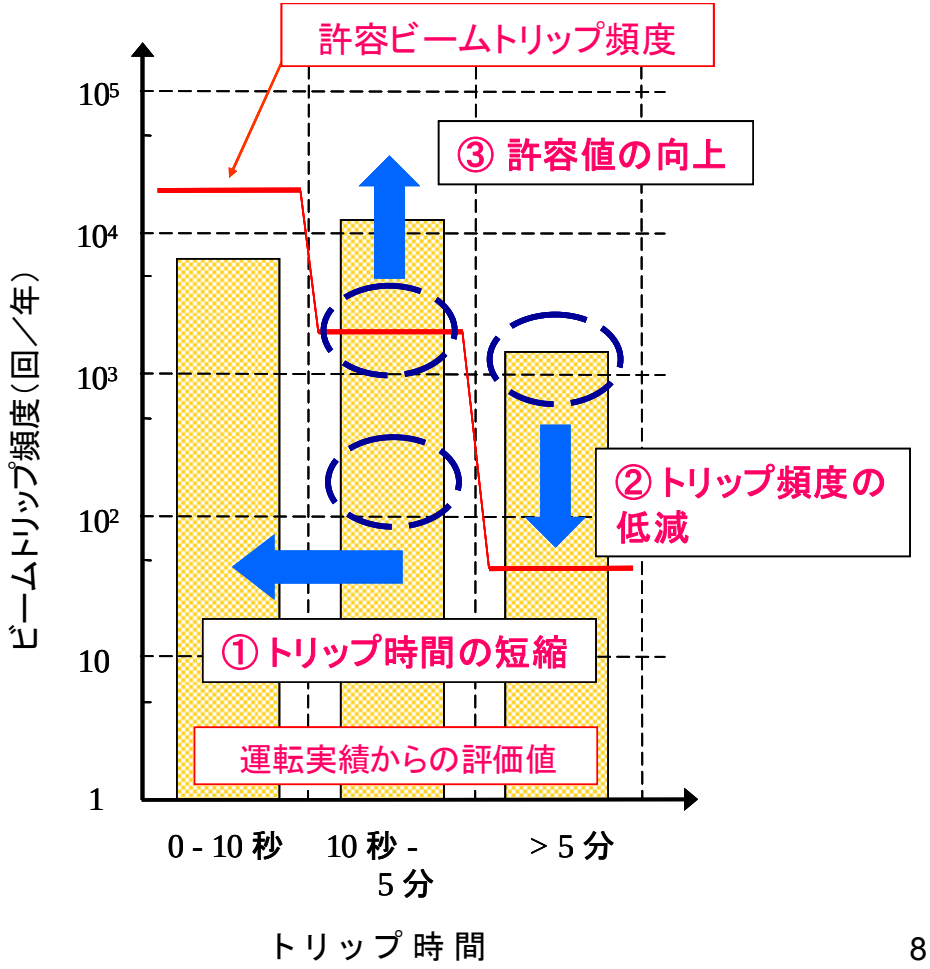


クライオモジュールの設置状況

ビームとリップ事象のADSへの影響評価

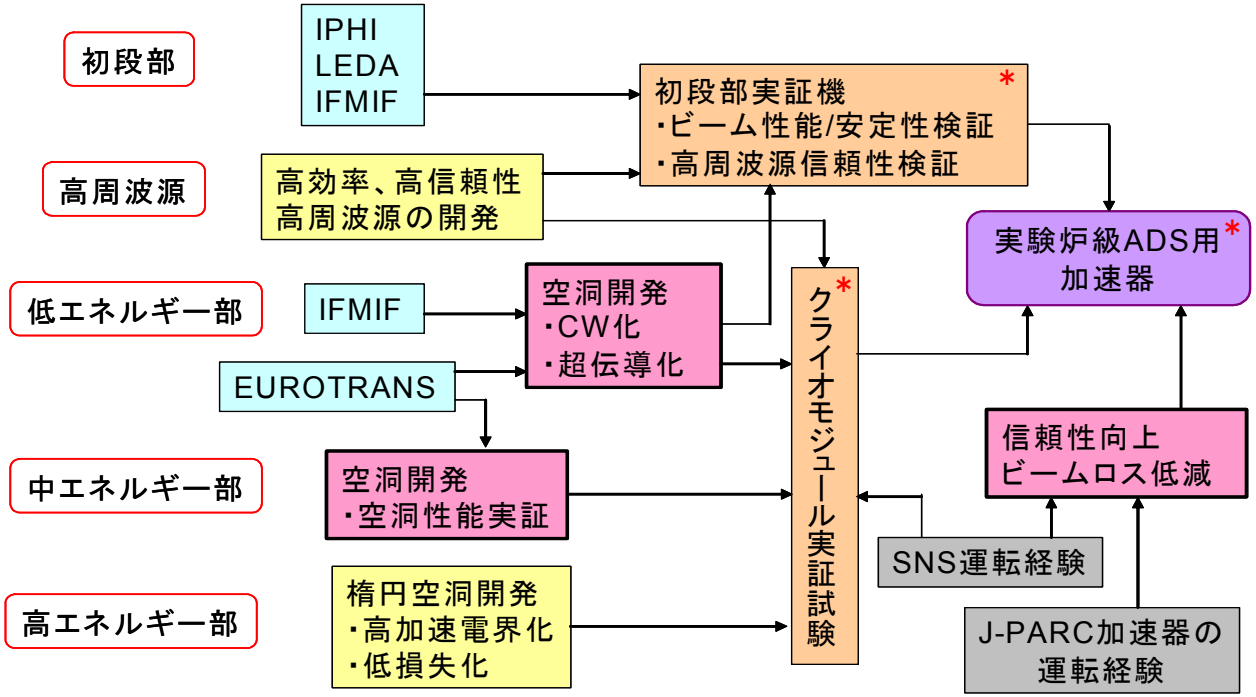
- ビームトリップ時の主要機器に対する熱負荷から許容ビームトリップ頻度を評価し、既存の加速器（SINQ、LANSCE）の運転データに基づいて推定したADS用加速器のビーム停止頻度と比較。
- 10秒以上のビームとリップについては、**現状の1/6～1/35**までビームトリップ頻度を低減する必要がある。
- **ADS用加速器の開発方針**
  1. トリップ時間の短縮
  2. トリップ頻度の低減
  3. ビームトリップ許容値の向上

ビームトリップ時間	許容ビームトリップ頻度	備　考
0 秒 < T < 10 秒	2×10^4 $> 5 \times 10^5$ 2×10^4 20,000 回/年	ビーム窓からの制限 燃料被覆管からの制限 内筒からの制限
10 秒 < T < 5 分	2×10^4 $> 5 \times 10^5$ 2×10^3 $> 2.5 \times 10^4$ 2,000 回/年	ビーム窓からの制限 燃料被覆管からの制限 内筒からの制限 原子炉容器からの制限
T > 5 分	42 回/年	プラント稼働率からの制限 （> 70 %）



ADS用加速器の技術的課題

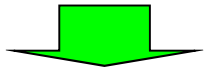
- **大電力化**　低/中エネルギー部のCW化、超伝導化が最大の課題。
- **出力制御**　パルス運転でのデューティ、ビーム電流値の調整により可能。
- **信頼性**　イオン源、高周波源、高周波放電の対策により対応可能。
  J-PARC、SNSの加速器運転経験が重要。
- **経済性**　現状の概算では想定の範囲内。さらに精度を向上させる必要有。



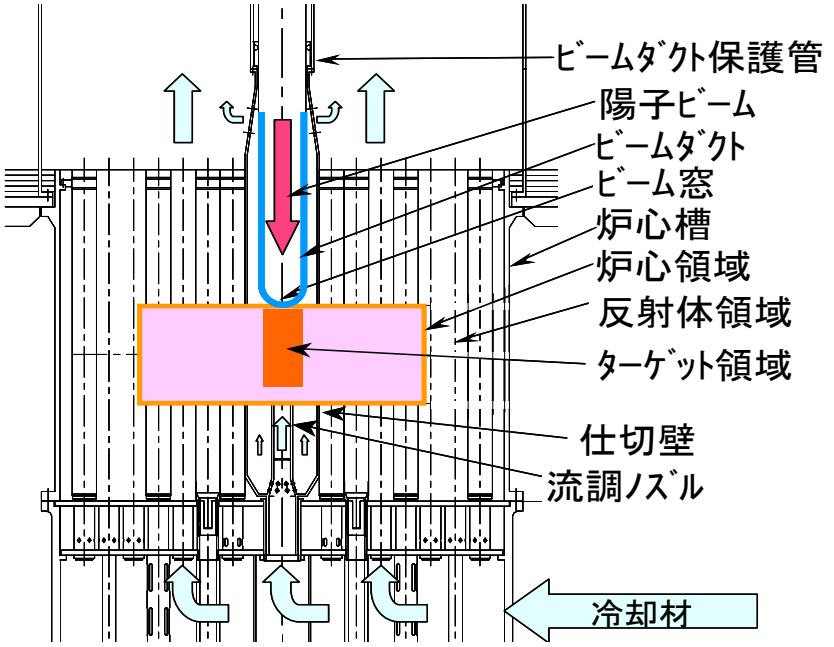
＊：　欧州が実験炉級ADSの建設計画を検討中であり、そのための加速器技術開発を想定

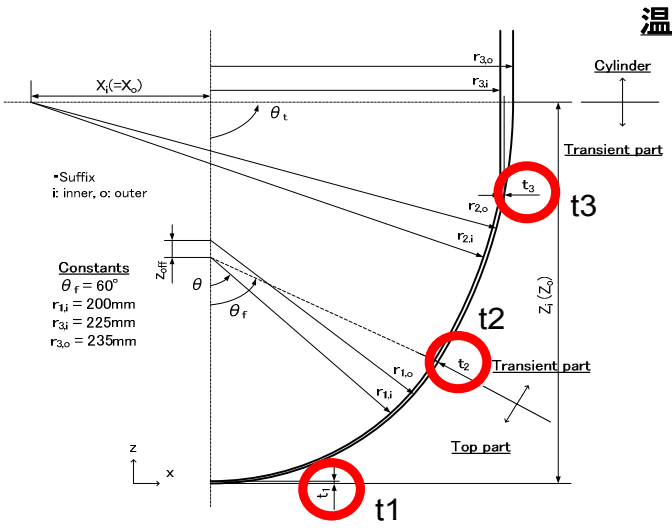
ビーム窓の工学的成立性の検討

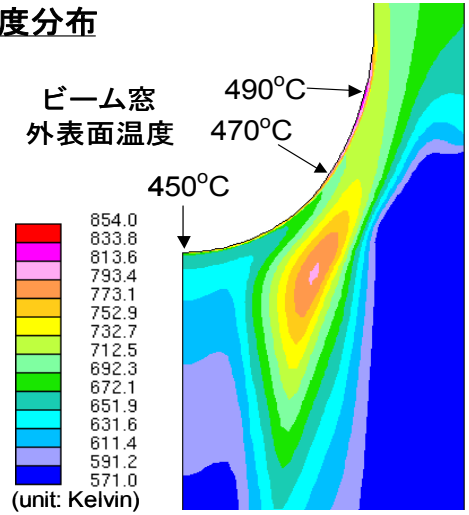
- ビーム窓構造成立性の検討条件
  - ✓ 設計外圧1.0 MPa（外圧のノミナル値=0.8 MPa）に対して安全率3を確保
- 検討条件
  - ✓ ビーム条件：1.5 GeV-20 mA（30 MW）
  - ✓ 鉛ビスマス流速: ＜ 2m/s
  - ✓ ビーム窓温度: ＜ 500ºC



- t1/ t2/ t3 = 2.0/ 3.0/ 3.0 mm(座屈圧力 3.54 Mpa)を選定。非照射条件で成立見込み (腐食考慮：約55μm/600日) 。
- 照射の影響
  - ✓ **照射硬化**：挫屈耐性増加 (PSIでの陽子照射試験結果からの類推)
  - ✓ **DBTT(延性脆性遷移温度)**：直接判断できる照射条件でのデータが無い
- **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。**



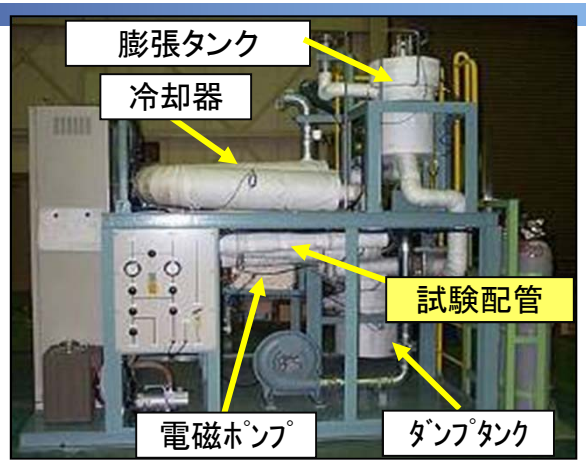




鉛ビスマスによる鋼材の腐食試験

原研 静的腐食試験装置
温度：550ºC

- 多種類の鋼材を、様々な条件で試験

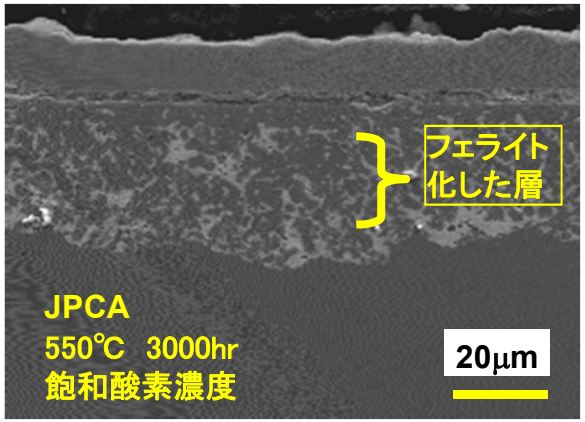


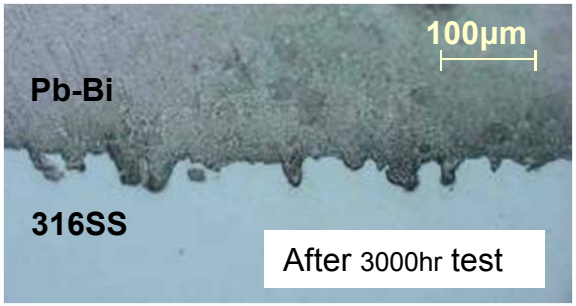
原研 Pb-Bi ループ-1 (JLBL-1)
流量：5L/min.　温度：450ºC

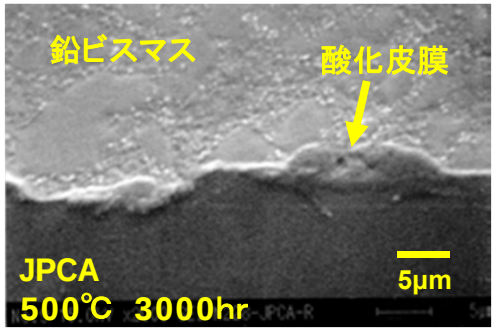
- 3000 時間の連続運転を3回実施。安定な運転実績
- 表面仕上げの影響、物質移行挙動等を検討中

三井造船 Pb-Bi ループ
流量：5L/min.　温度：500ºC

- F82H (ﾏﾙﾃﾝｻｲﾄ系)とJPCA (ｵｰｽﾃﾅｲﾄ系)の試験を委託
- 衝突噴流でも大きな損傷は確認されていない



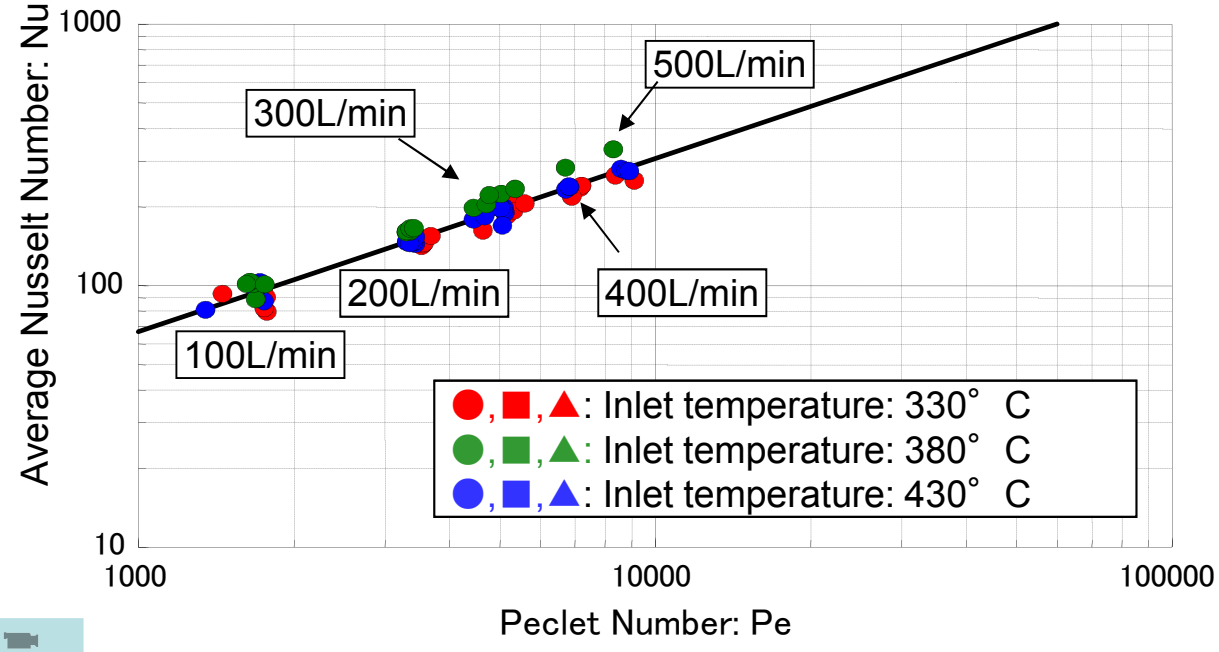


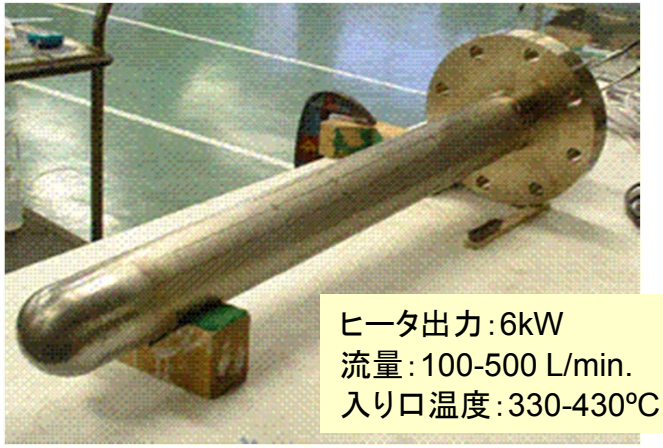


- 機械式ポンプのインペラの観察では、3000時間でエロージョンは観察されていない
- その他、液体金属中脆化、不純物除去方法、酸素濃度の測定・制御方法等を研究中

鉛ビスマスによるビーム窓模擬体の冷却試験

ループ全景





ヒータ出力：6kW
流量：100-500 L/min.
入り口温度：330-430°C

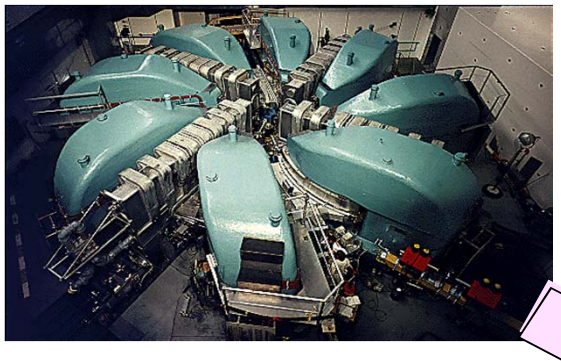
ビーム窓模擬試験体

オーバーフロー部の流況

- 先端部で温度の不安定挙動が観察される
- 全体的な熱伝達特性は、乱流モデルに低Re数型線形k-εモデルを用いると精度良く予測できる
- 超音波流速分布計の開発も実施中

MEGAPIE国際共同実験

- スイス・ポールシェラー研究所（PSI）の加速器中性子源施設SINQを利用
- スイス、フランス、ドイツ、ベルギー、イタリア、日、米、韓が参加
- 2006年8月17日に700kW（1.2mA×590MeV）の入射に成功
- その後、供用を開始し、12月21日まで運転
- 照射後の材料試験の準備中

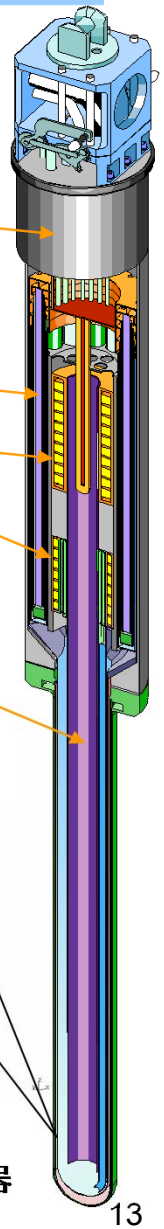


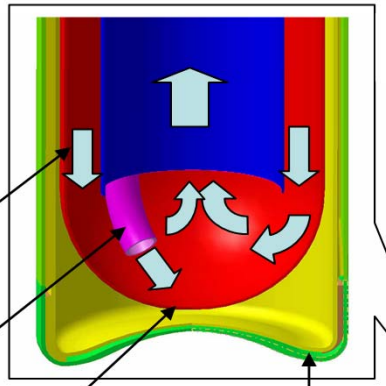
575MeV陽子サイクロトロン

中性子源施設SINQ

陽子ビーム

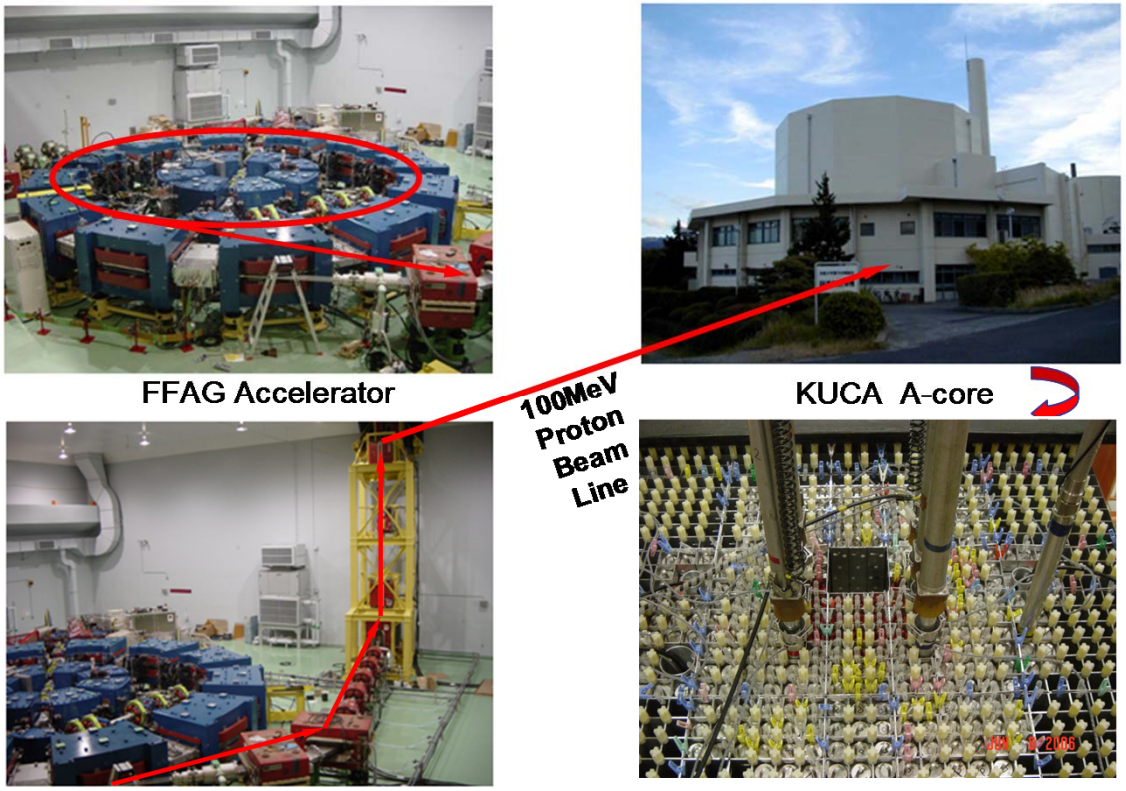
ターゲット本体

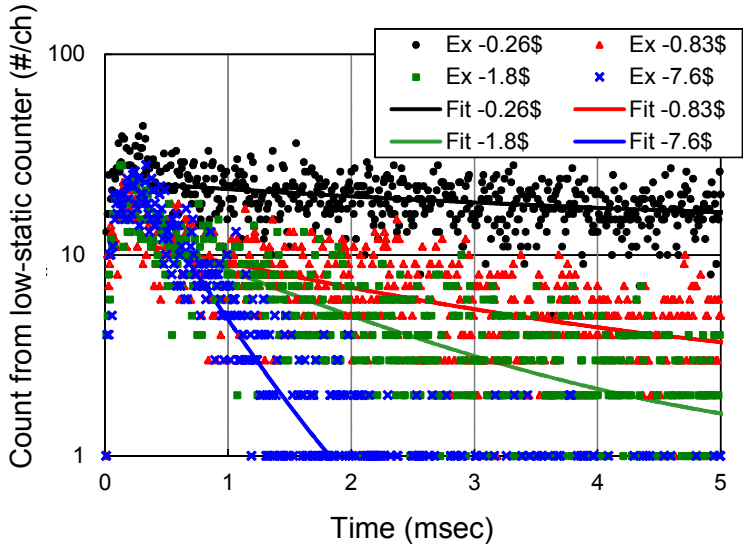




ADS用未臨界度測定技術の開発

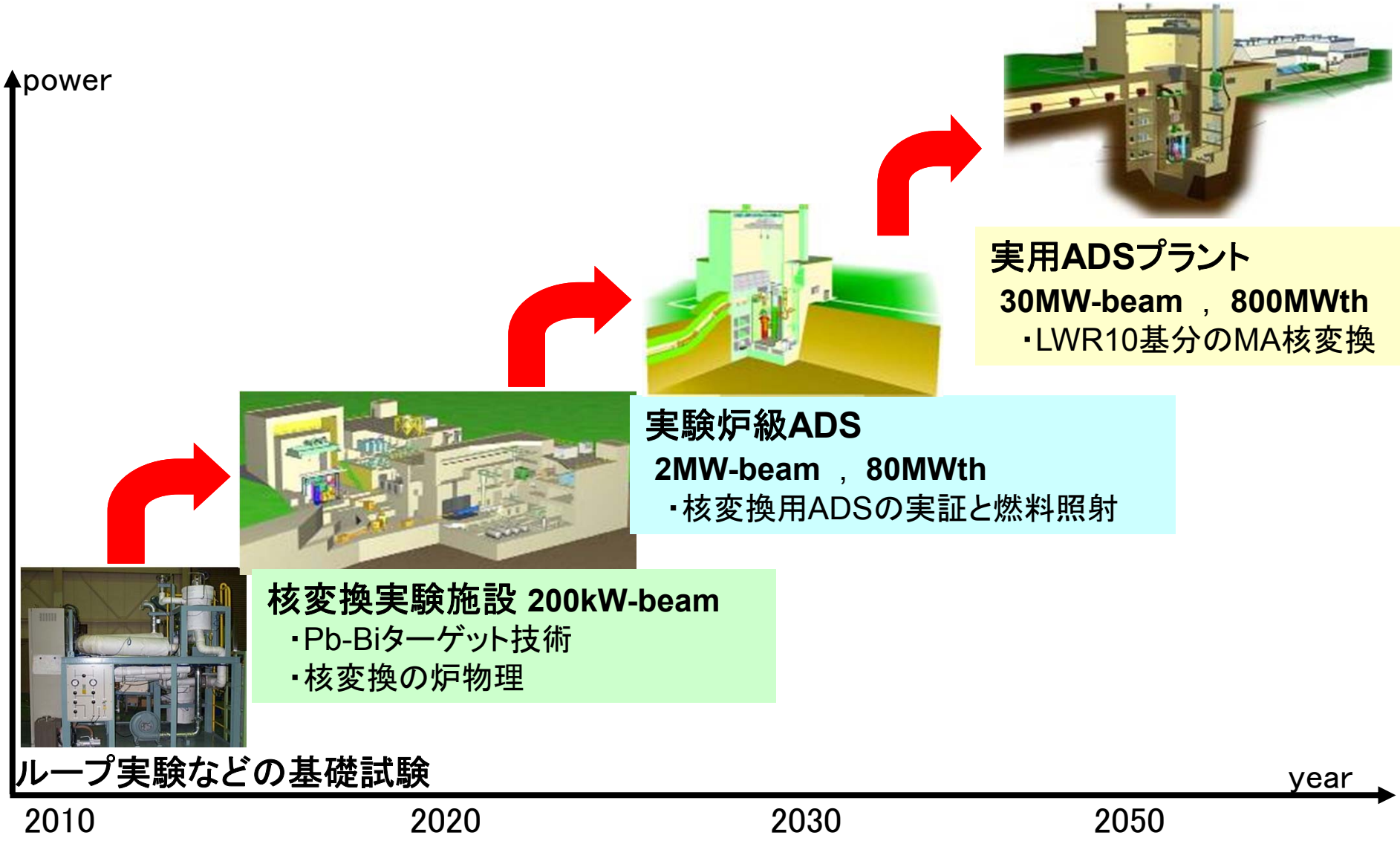
- パルス中性子法を適用して、検出感度の低い検出器で未臨界度を測定するための技術開発を実施。
- KUCAにおける実験で、未臨界度を十分な精度で導けることを確認。
- 今後、KUCAで制御棒によって未臨界度を変動させ、検出器データの履歴を取り、事後解析によって未臨界度モニタリングを実証する。





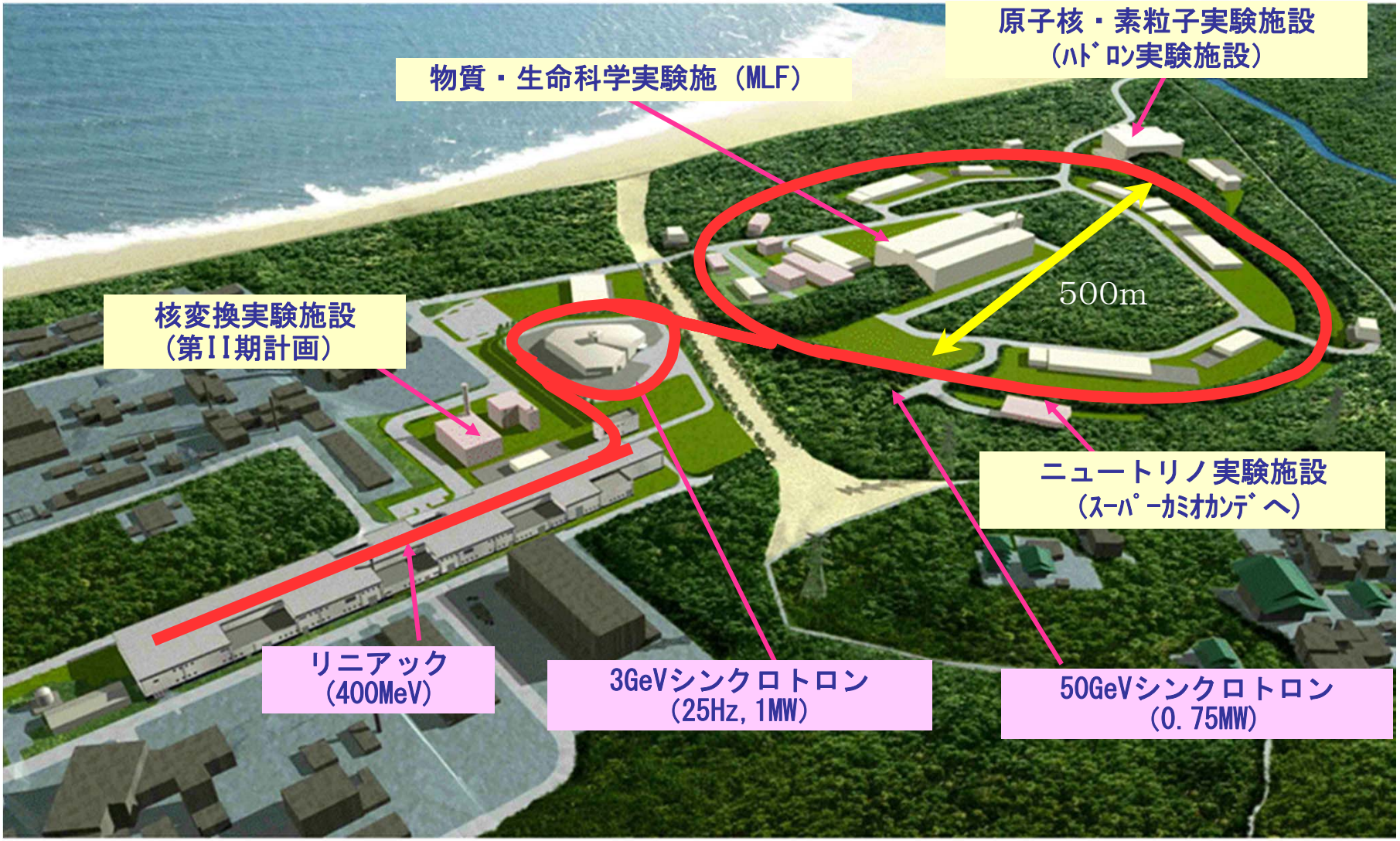
100HzのDT中性子源を用いたKUCA実験で得られた、感度の低い検出器からの計数率（通常の検出器で0.2秒間に得られる計数率に相当する。）

ADSの開発段階

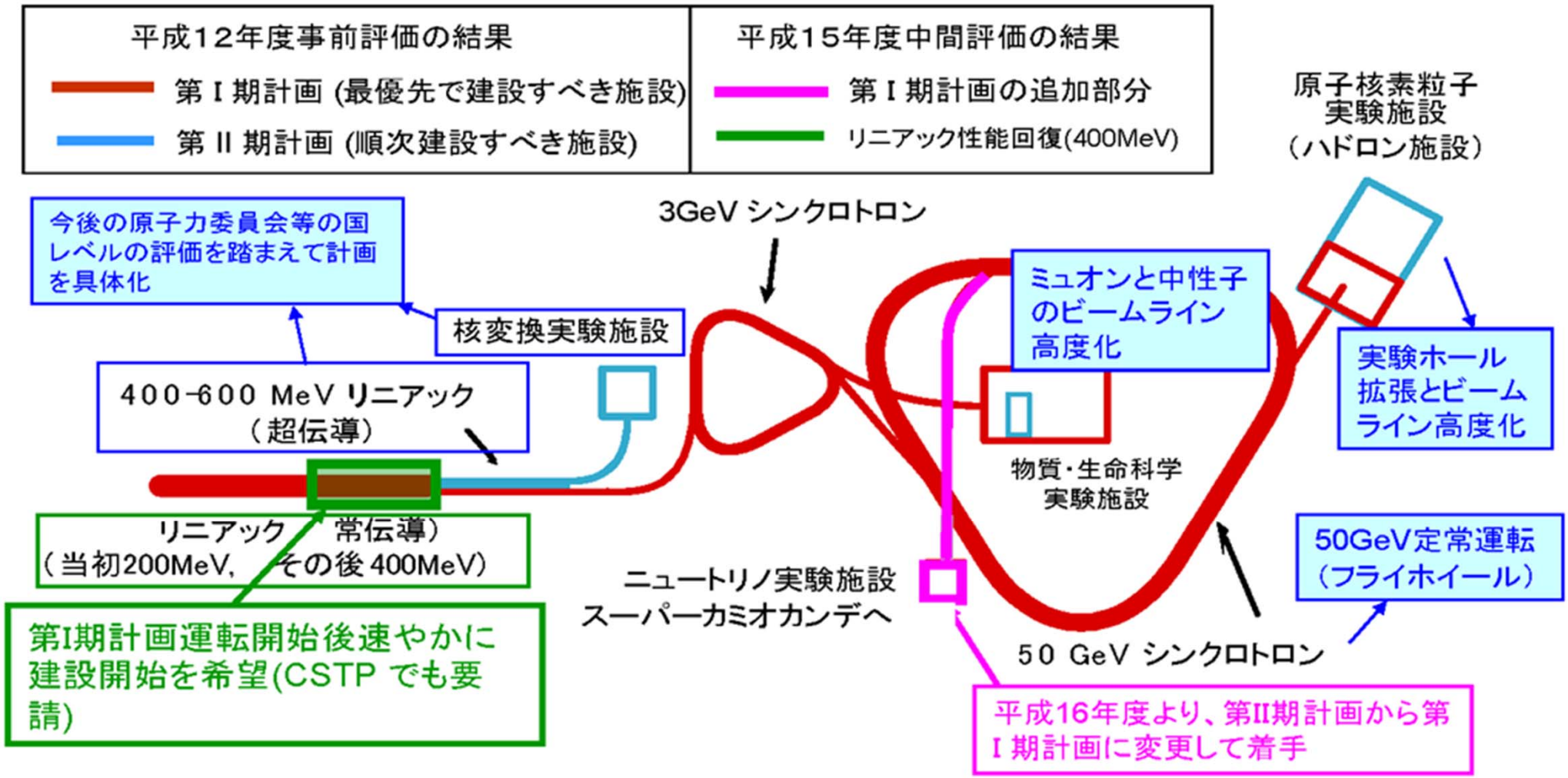

power
実用ADSプラント
30MW-beam ， 800MWth
・LWR10基分のMA核変換
実験炉級ADS
2MW-beam ， 80MWth
・核変換用ADSの実証と燃料照射
核変換実験施設 200kW-beam
・Pb-Biターゲット技術
・核変換の炉物理
ループ実験などの基礎試験
year
2010
2020
2030
2050

大強度陽子加速器施設（J－PARC）の構成

日本原子力研究開発機構 と高エネルギー加速器研究機構の共同事業



I期計画とII期計画の分割



J-PARC施設状況

リニアック棟加速器トンネル
（平成18年11月からビーム試験開始）

3GeVシンクロトロントンネル
（平成19年10月からビーム試験開始）

50GeVシンクロトロントンネル
（平成20年5月からビーム試験開始）

原子核・素粒子(ハドロン)実験施設
（平成21年2月から稼働開始）

ニュートリノ実験施設

ニュートリノ第1設備棟

ニュートリノ第2設備棟

（平成21年4月から稼働開始）

物質・生命科学実験施設
（平成20年12月から供用開始）

第2実験ホール

J-PARC第Ⅱ期:核変換実験施設

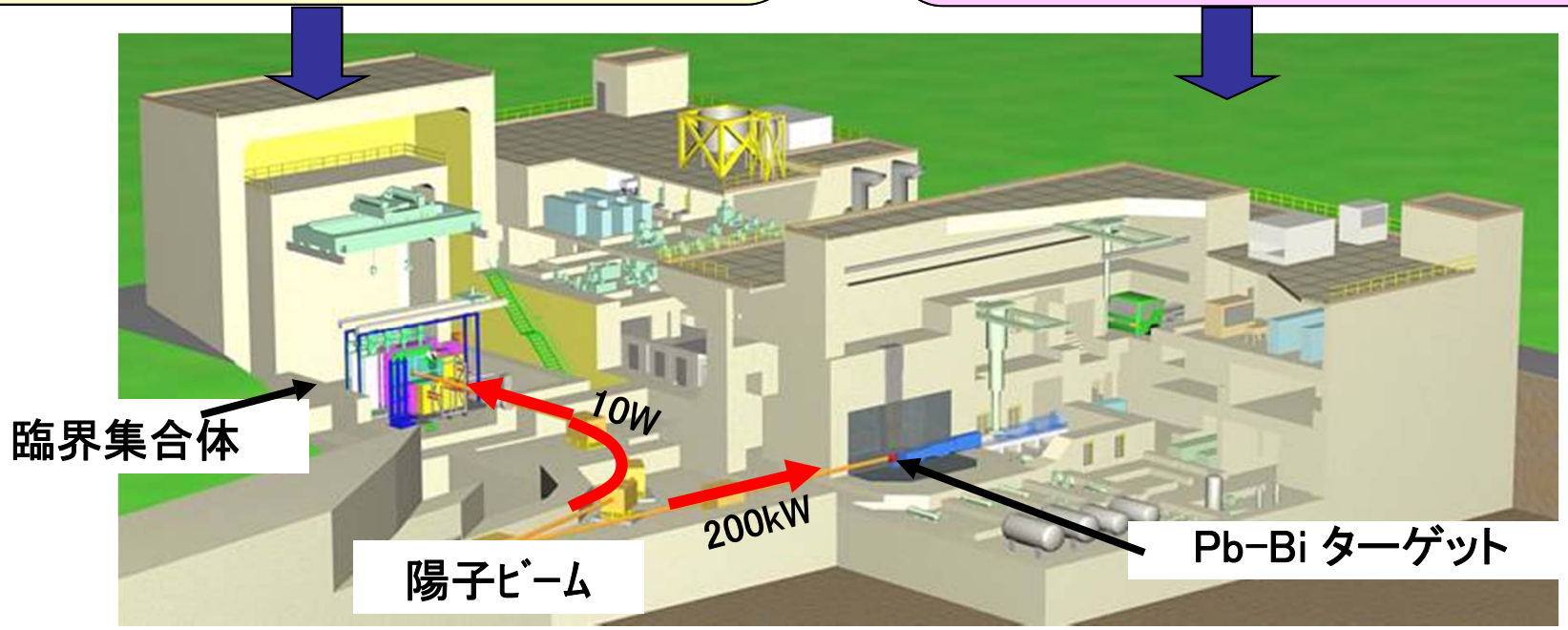
J-PARCにおける核変換実験施設計画（第Ⅱ期計画）

核変換物理実験施設

目的：低出力で未臨界炉心の物理的性質を探るとともに、ADSの運転制御経験を蓄積する
施設区分：原子炉（臨界実験施設）
陽子ビーム：600MeV、10W
熱出力　：500W以下

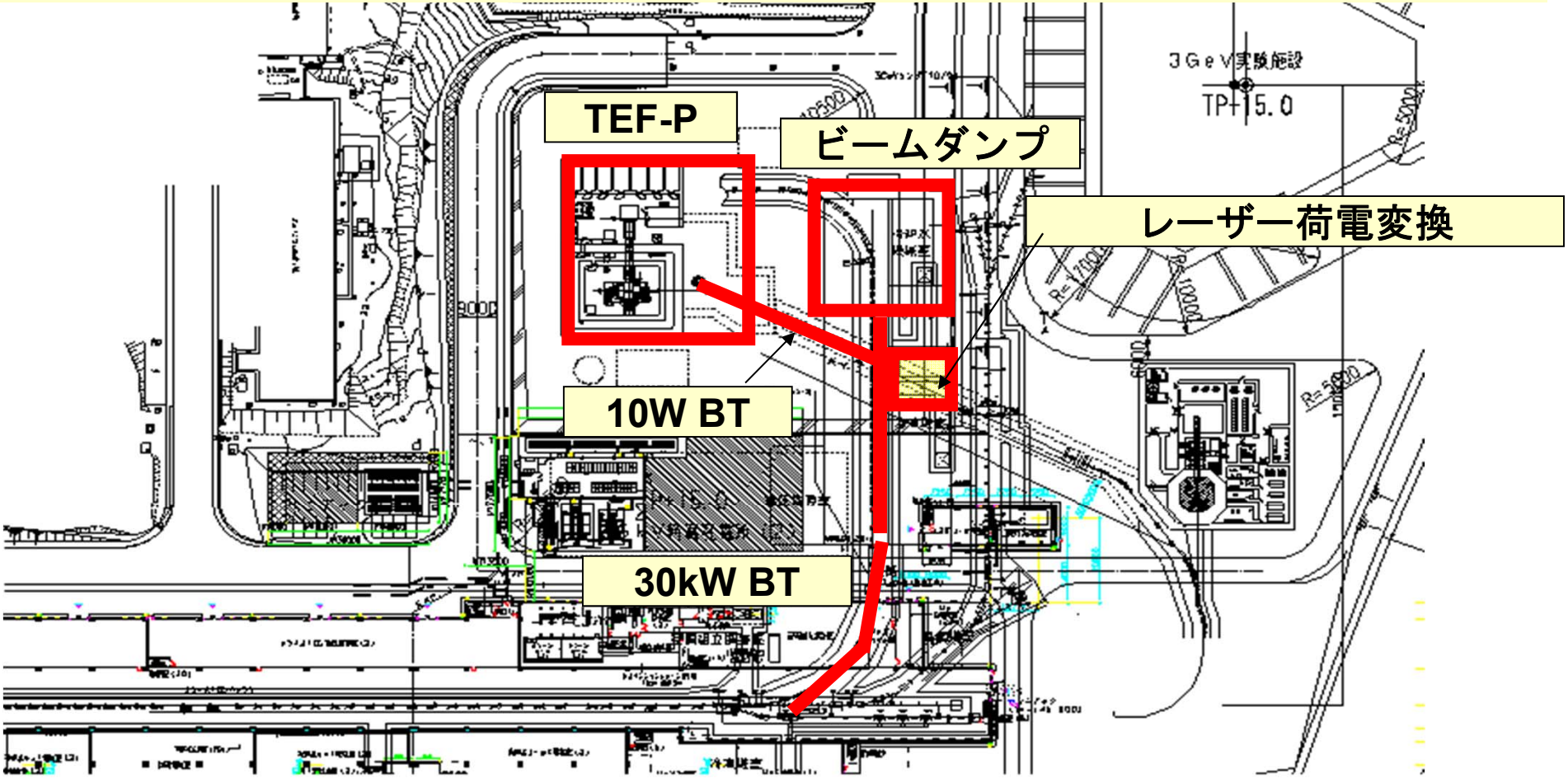
ADSターゲット試験施設

目的：200kWの陽子ビームで核破砕ターゲットの技術開発と材料の研究開発を行う
施設区分　：放射線発生装置
陽子ビーム　：600MeV、200kW
ターゲット材料：鉛・ビスマス



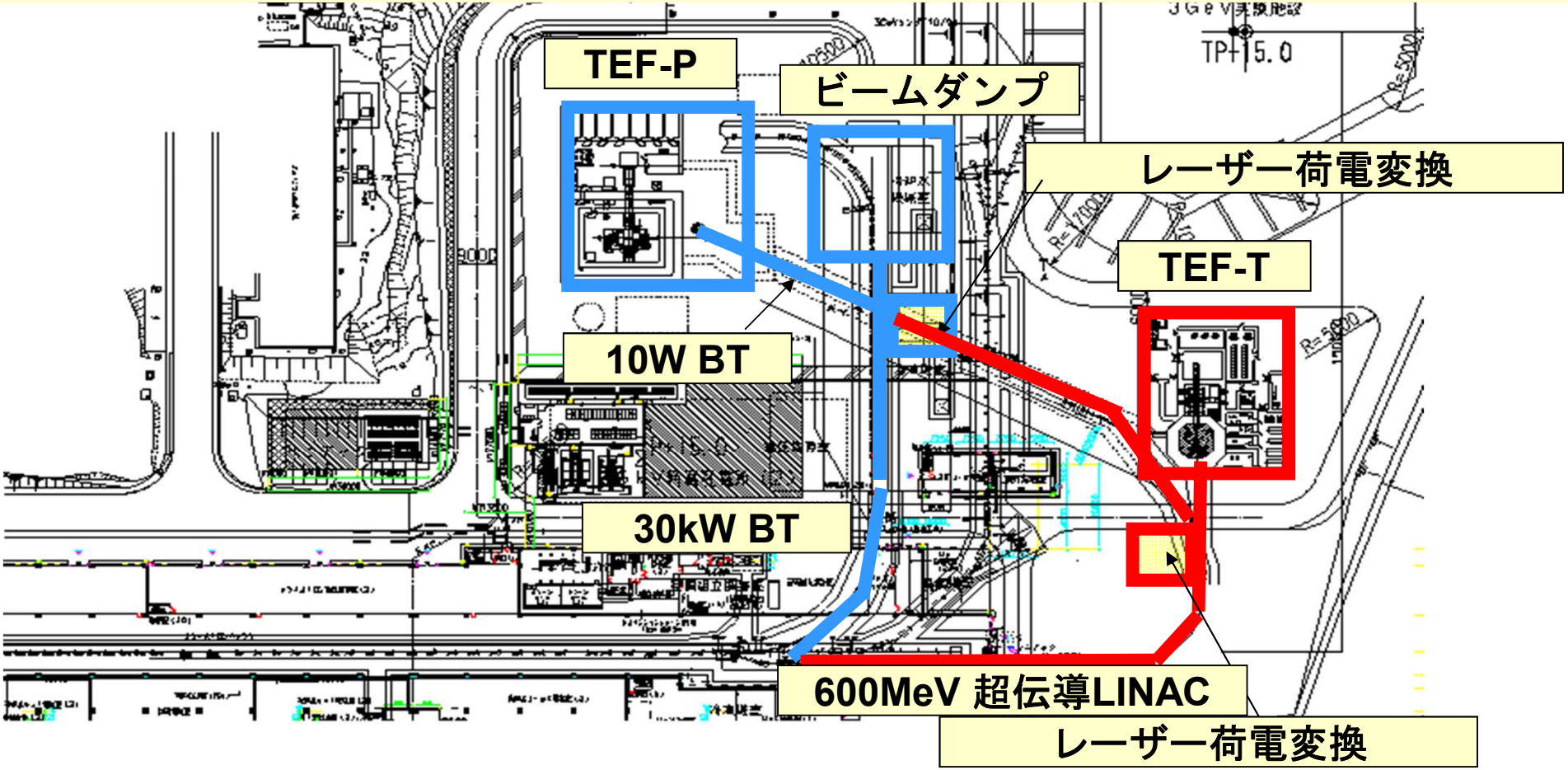
核変換実験施設計画：段階的整備案　前期

- 400MeV, 30kW (最大)のビームで最小限の実験開始
- ビームダンプ、レーザー荷電変換、TEF-Pを整備



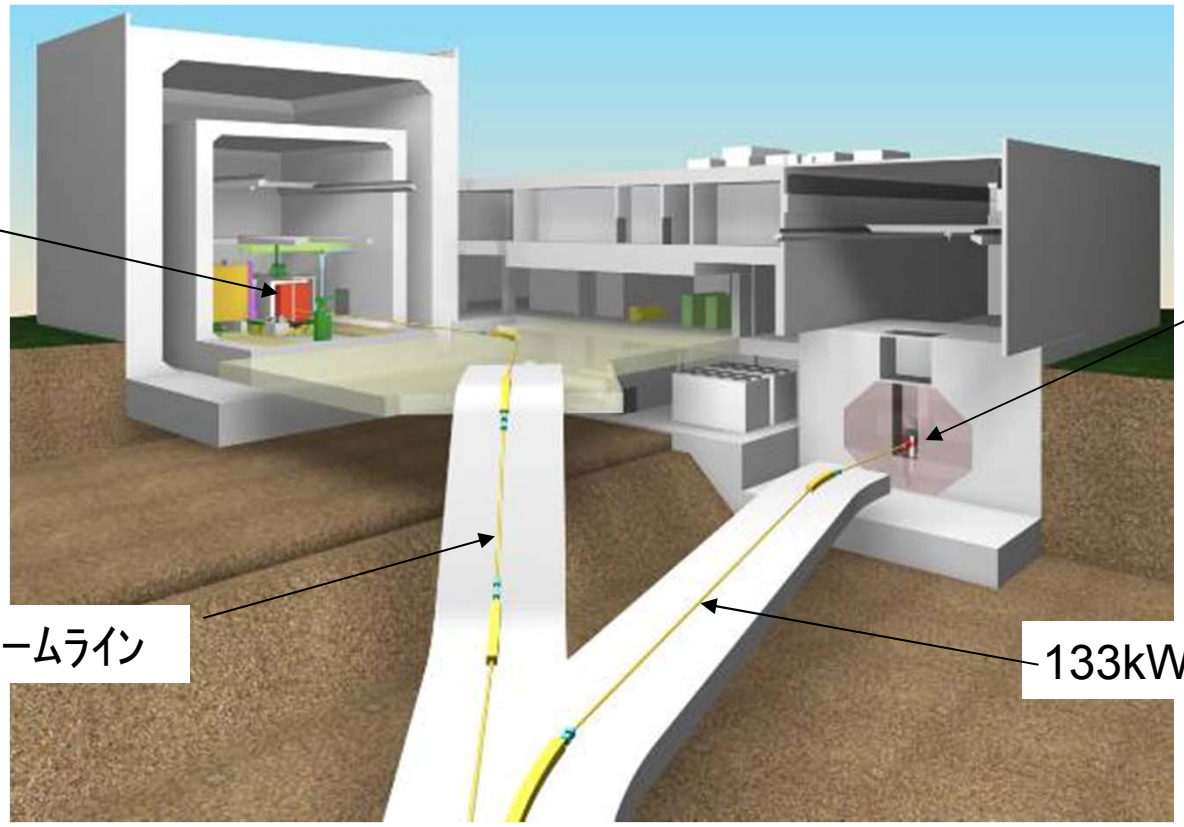
核変換実験施設計画：段階的整備案　後期

- 600MeV超伝導LINAC、TEF-Tを整備
- 600MeV・10WビームをTEF-Pに導入できるように、レーザー荷電変換装置とビーム輸送系を整備



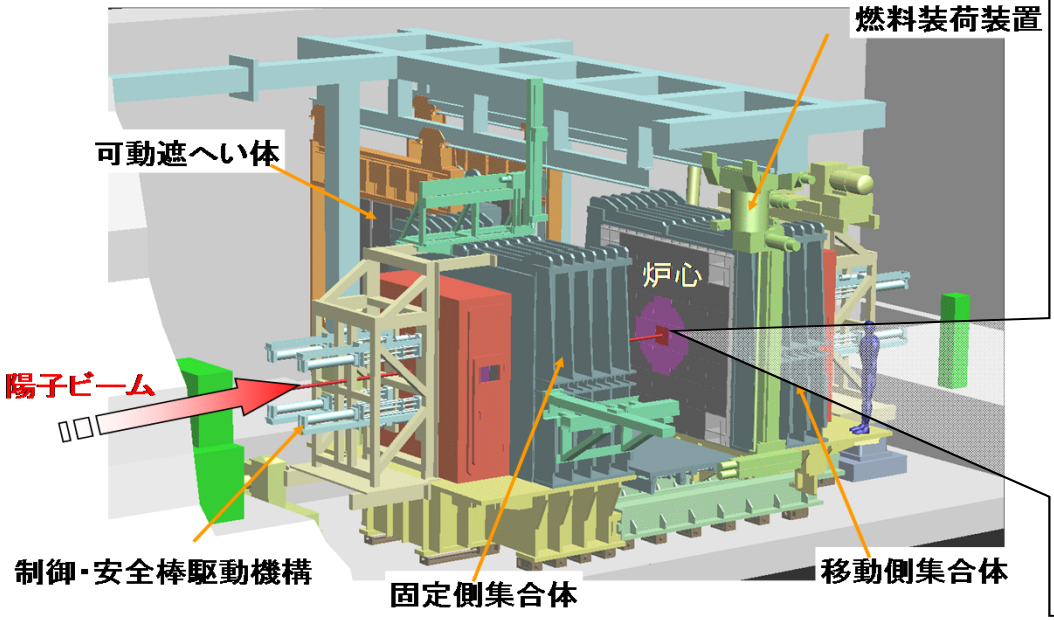
核変換実験施設(前期施設):TEF-P先行・400MeV入射

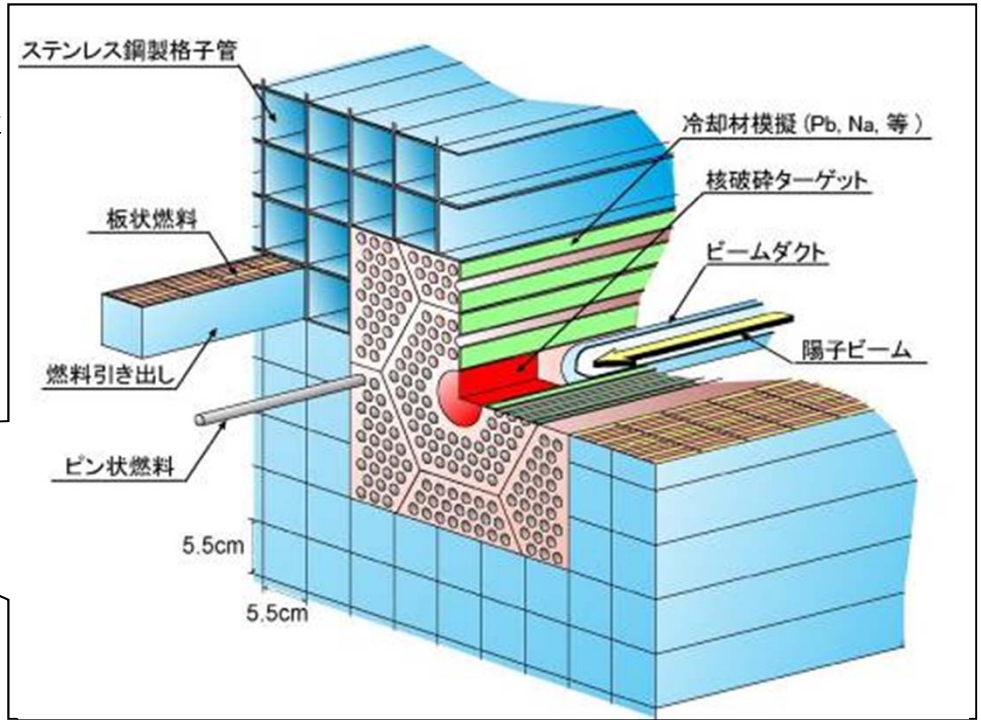
- 汎用性が高い核変換物理実験施設とﾋﾞｰﾑﾀﾞﾝﾌﾟ設備をまず建設
- ﾋﾞｰﾑﾀﾞﾝﾌﾟ設備では、陽子ﾋﾞｰﾑ(400MeV、最大133kW)を用いた放射線工学実験が可能
- 陽子ﾋﾞｰﾑ、核破砕中性子、核燃料を用いた核工学実験施設として整備
- MA燃料を取り扱える施設とし、ADS・高速炉を用いた核変換技術の基盤を整備



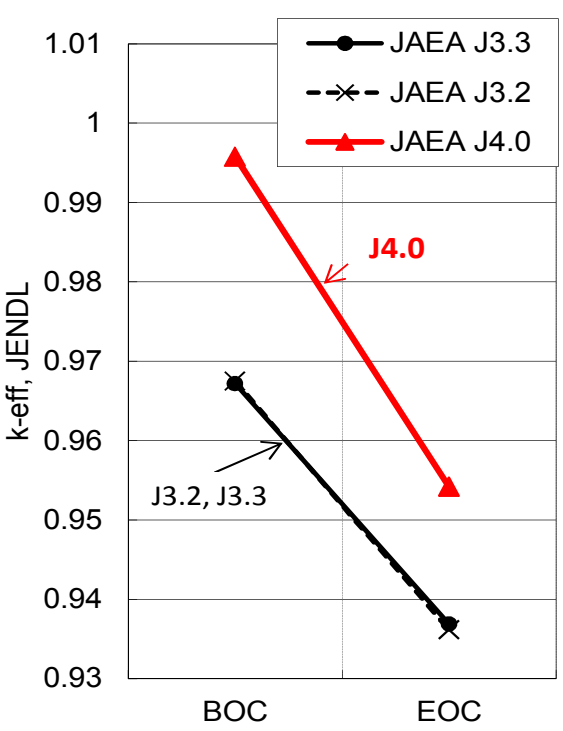
核変換物理実験施設(TEF-P)

- FR、ADS等の高速中性子体系の炉物理や核データ積分実験を行う低出力の臨界実験装置
- 10W・25Hz陽子ビーム投入時の中性子源強度は10^{12}n/s（炉心熱出力500W）
- レーザー荷電変換装置を用いることでパルス幅1nsの陽子パルスを導入可能
- 中心5×5格子管部が交換可能な構造を有し、ピン燃料に対応した冷却材ブロックを使用可能
- MA燃料に対応した遠隔操作機器を設置

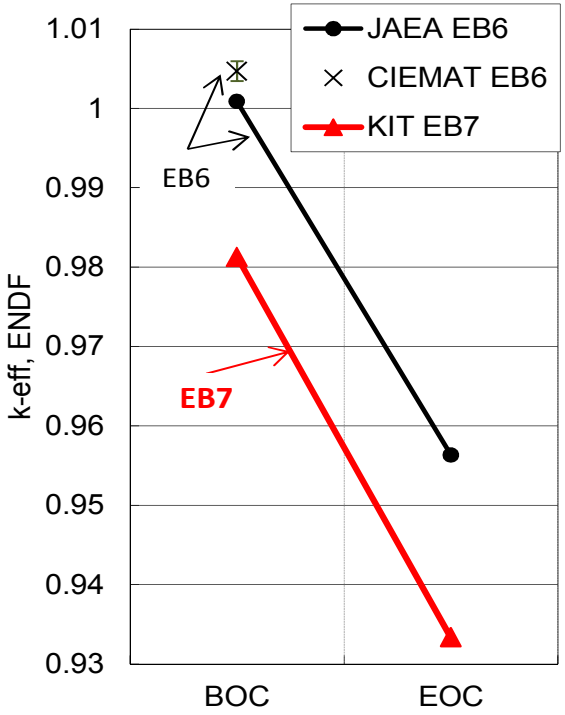




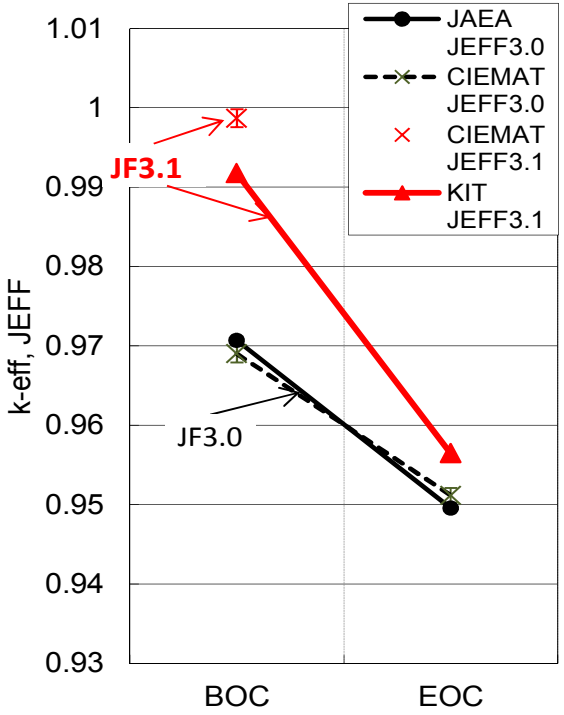
ADSベンチマーク計算



JENDL



ENDF



JEFF

- 実効増倍率：**0.98 ～ 1.0**（BOC）、**0.93 ～ 0.96** (EOC)
- いずれのライブラリにおいても、バージョンアップで **2 ～ 3** %dkの実効増倍率変化

共分散データによる核データ起因誤差評価

	JENDL-3.3		JENDL-4.0	
	解析値	**GMG^{t}** *1	解析値	**GMG^{t}** *1
実効増倍率 (k-eff)	0.971	**1320 pcm**	0.999	**1090 pcm**
冷却材ボイド反応度 [Δk/k]	5300 pcm	350 pcm (6.6%)	3500 pcm	280 pcm (8.1%)
ドップラー係数 [TΔk/dT]	-3.5e-4	7.0%	-3.3e-4	6.3%

*1: 核データ起因誤差（1σ）

- JENDL-4.0により評価した核データ起因誤差は、JENDL-3.3に比べると小さくなっている
- 実効増倍率に対する核データ起因誤差（1090pcm)は、両ライブラリを用いた解析値の差（約2800pcm)よりもずっと小さい

MA装荷実験の必要性

- 解析コード間の相違（決定論 vs モンテカルロ）は小さい
- ライブラリ間の相違は極めて大きい

  実効増倍率：**0.98 ～ 1.0**（BOC）、**0.93 ～ 0.96** (EOC)

現状で、仮にADSを設計しようとしても極めて不確実性が高い

⇒ 核データ起因誤差を定量化し、誤差要因となっている核種・反応の核データ誤差を低減することが必要

MA燃料の利用に関する検討

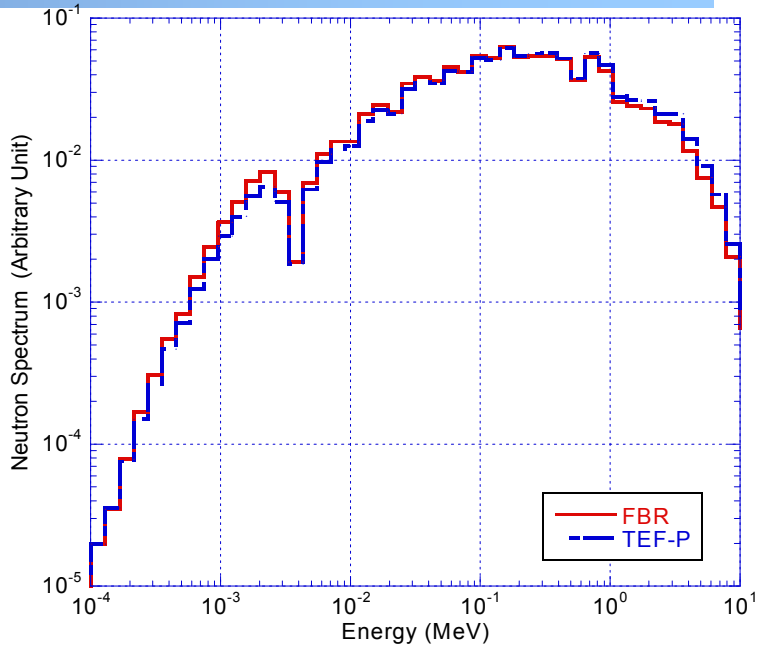
次世代原子力システム研究開発部門及び原子力基礎工学研究部門との共同で検討を実施

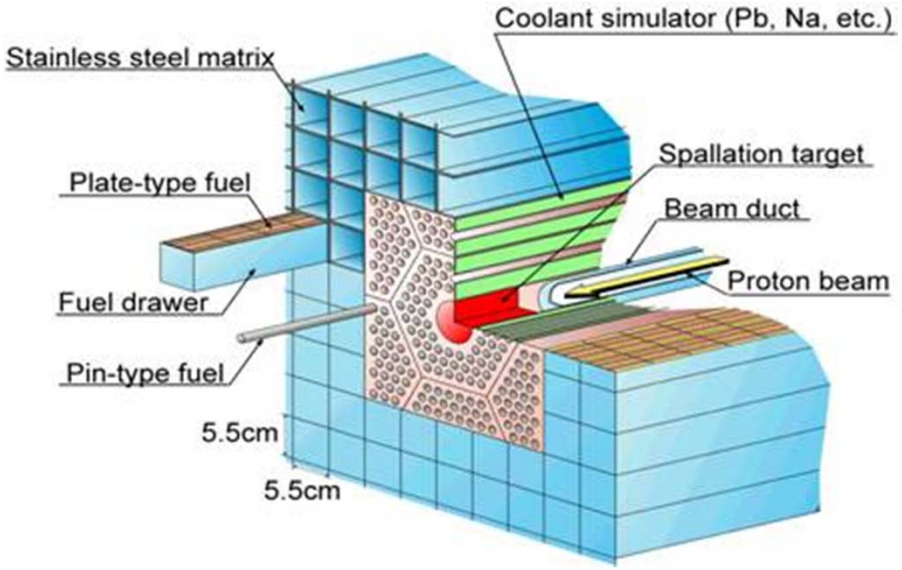
製作可能かつ有意な炉物理データが得られるMA燃料

・MOX燃料+Np-237/Am-241（最大5%程度）

実用炉スペクトル模擬に上記燃料を用いる場合

・25cm×25cm×60cmL程度のドライバー領域が必要

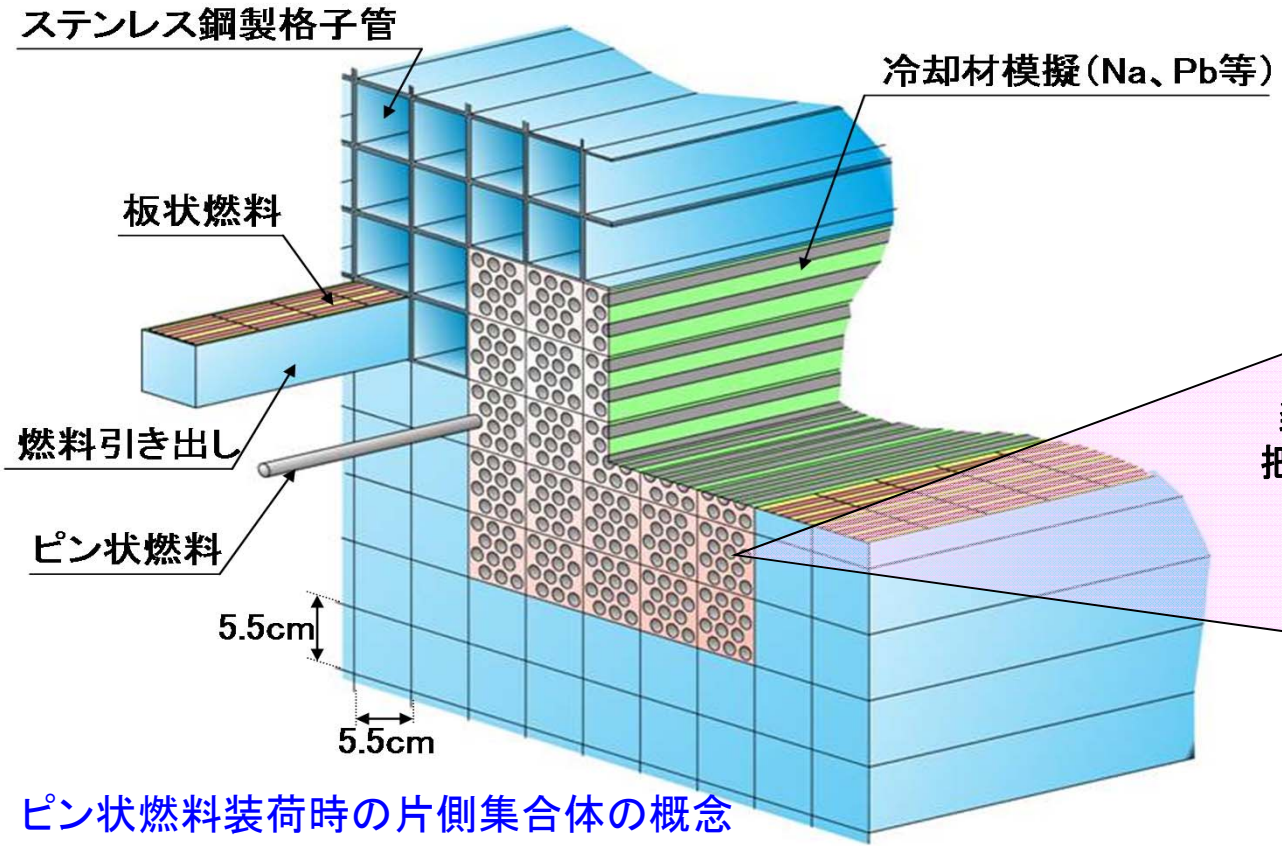




	Pu, MA Composition	Loading Area: 28cm×28cm×60cm		
		Heat (W)	Photons (p/s)	Neutrons (n/s)
MOX-FBR	UO_2(17%Pu)	7.1×10^{2}	3.1×10^{13}	7.5×10^{6}
MOX-FBR with 5%MA	UO_2	1.1×10^{3}	3.2×10^{14}	7.1×10^{6}
	MOX	1.5×10^{3}	5.3×10^{14}	9.5×10^{6}
(MA+Pu+Zr) Nitride	UO_2	1.6×10^{3}	8.3×10^{14}	3.4×10^{6}
	MOX	2.6×10^{3}	1.5×10^{15}	4.5×10^{6}
	MOX with14%Cm	1.3×10^{4}	1.3×10^{15}	1.5×10^{10}

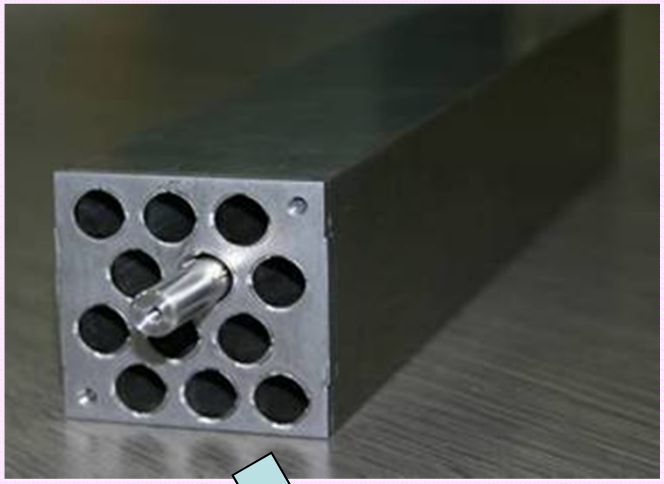
MA装荷実験の概念

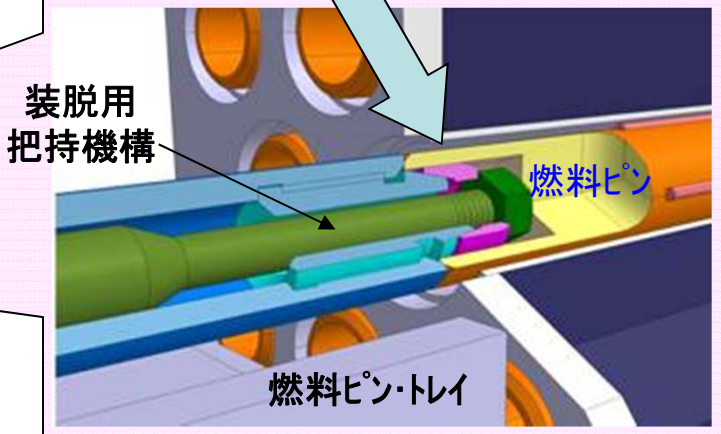
- 通常燃料は板状とするが、MA燃料は製作性の観点からピン形状とする
- 高線量燃料ピンの装填・装脱は遠隔操作で行う
- 燃料ピンと燃料用ブロックに間隙を設け、空冷する



ピン状燃料装荷時の片側集合体の概念

試作したピン状燃料用ブロック

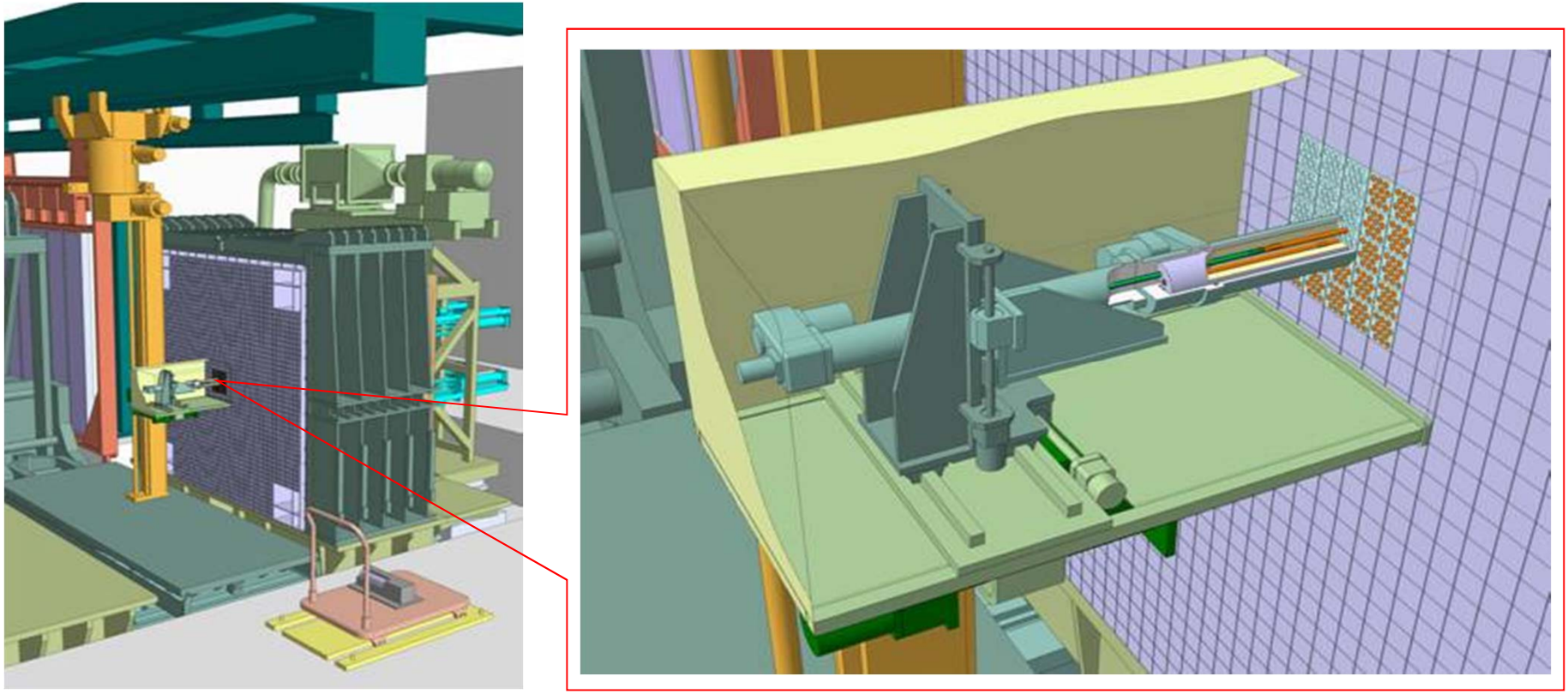




遠隔操作用のピン把持機構の検討

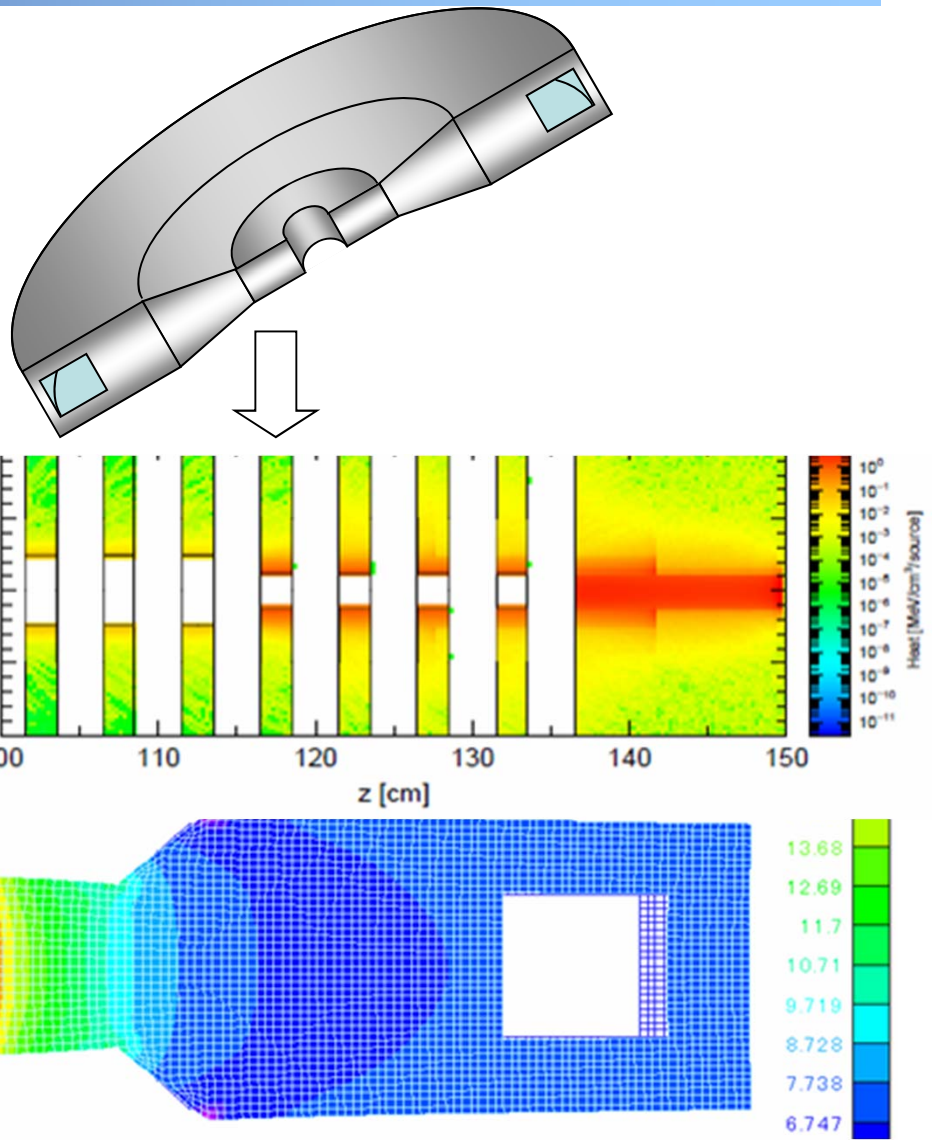
MA含有燃料のハンドリング

- MA燃料は遮蔽・臨界防止を兼ねたカートリッジに収納
- MA含有燃料の炉心への移送・装荷は遠隔操作で実施
- MA燃料保管庫は専用の空調設備と遠隔燃料移送機能を付加
- 遠隔操作についての予備検討を実施している



多層ディスク型ビームダンプ

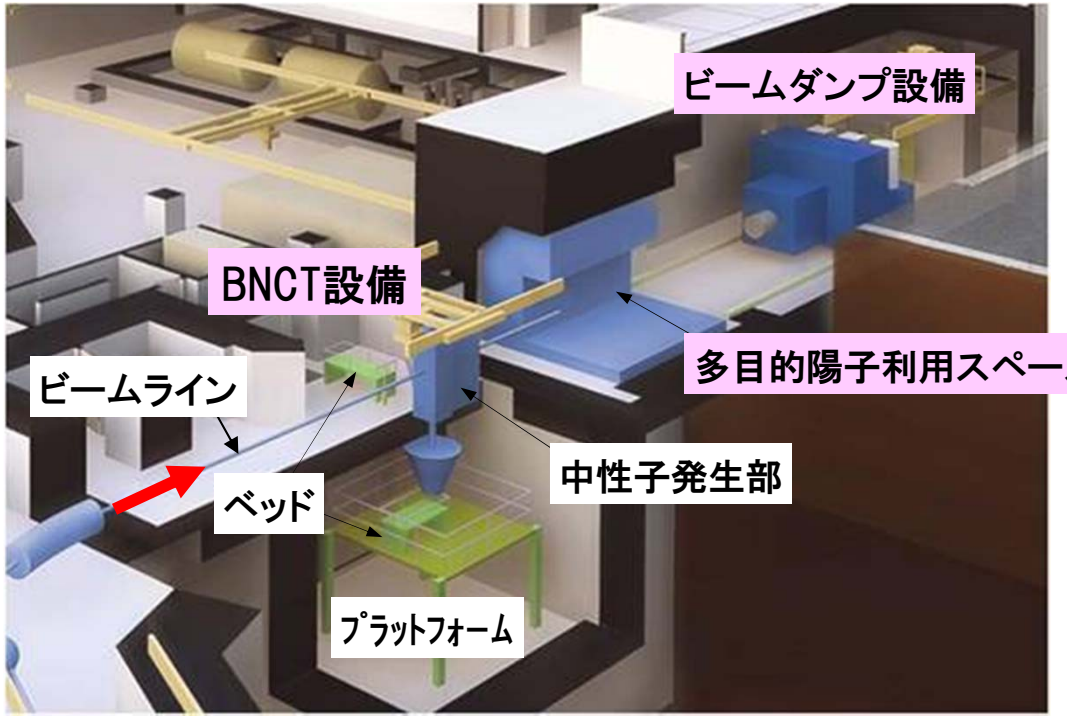
- 円環ディスクを積層し、コーン形状の面にビームをダンプ
- 最高温度（約300℃）となる部位の構造解析を実施
- 30kW運転での健全性を確認
- 陽子ビーム密度の調整及びディスク材質の向上（銅中の酸素成分の低減など）により、200kWビームの入射にも対応



核変換実験施設 ビームダンプ利用

- 現状では、J-PARCには3GeVより低いエネルギーの陽子を利用できる施設が無い。
- ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)による癌治療、放射性同位元素(RI)の製造、材料照射試験、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。
- このため、LINACからの400MeV陽子のビームライン、BNCT設備、ビームダンプを整備する。

◎ BNCT → 加速器中性子源を用いた癌治療実用化への研究開発
◎ RI製造 → 我が国におけるRIの安定供給に貢献
◎ 材料照射 → 核破砕ターゲット、核融合材料等の材料照射試験
◎ 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

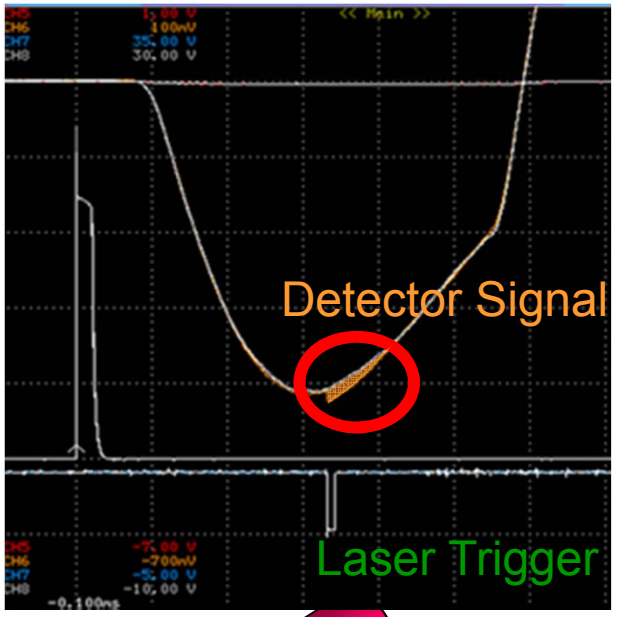


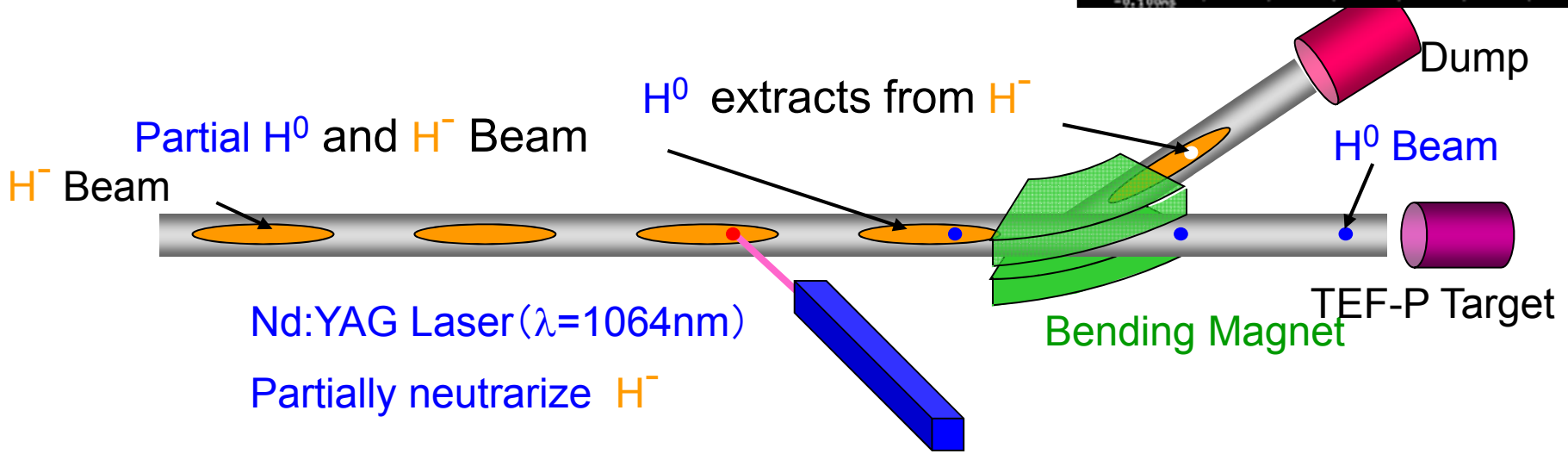
- 陽子・中性子利用の新たな可能性が広がり、産業の活性化や新たな知の創造につながる。

- ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)に陽子ビームによる中性子源を用いるには、400MeV、30kW程度の陽子ビームが最適
- この他、RI製造、材料照射試験、物理学実験などの多目的利用を図るには、余剰陽子を受け入れるﾋﾞｰﾑﾌﾀﾞﾝﾌﾟが必要

低出力陽子ビーム取り出しの実証

- 偏向部での荷電変換によるビーム取り出しに成功
- 以下の用途への適用可能性
  - 実験目的に応じた多様なビーム取り出し
  - ビームハロー成分を取り除いた高精度なビーム供給
  - 炉物理実験に不可欠な安全で安定したビーム出力
  - 多目的利用に適する極短パルスビームの生成





まとめ

■ ***核変換専用の加速器駆動システム(ADS) を提案***

- JAEAを中心に様々な研究開発を実施中。

■ ***J-PARCは第Ⅰ期建設を終了、供用運転を開始***

- 核変換以外の実験施設は順調に稼働
- 東日本大地震で施設・装置に被害。12月中旬の再稼動を目指して復旧作業中。

■ ***J-PARC第Ⅱ期:核変換実験施設の検討***

- 先行着手する予定のTEF-P+ビームダンプに関する技術開発
- 実現可能なMA含有燃料のスペックと必要な遠隔設備の開発
- ビームダンプ構造の検討
- レーザーを用いた柔軟な陽子ビーム取り出し技術の実証

■ ***第3期中期計画(H27～31） での建設を目指したい***