

## 核データ・炉物理特別会合 (3)

### 核変換実験施設の検討状況

日本原子力研究所

大強度陽子加速器施設開発センター

大井川 宏之

oigawa@omega.tokai.jaeri.go.jp

#### はじめに

日本原子力研究所（原研）は、高エネルギー加速器研究機構（KEK）と共同で大強度陽子加速器計画（愛称 J-PARC: Japan Proton Accelerator Research Complex）を進めており、現在、東海研究所において第 1 期施設の建設が進められている。同計画の第 2 期施設では、長寿命放射性核種の核変換処理を目的とした加速器駆動未臨界システム（Accelerator Driven System: ADS）の基礎実験を行う「核変換実験施設」の建設を予定している。ADS は、マイナーアクチニド（MA）を多く含む燃料で未臨界体系を構成し、陽子加速器を使った大出力核破砕中性子源で MA による核分裂の連鎖反応を維持するシステムである。核変換実験施設は、600MeV・200kW の陽子ビームを用いて核破砕ターゲットの開発と関連する材料の研究を行う「ADS ターゲット試験施設」と、600MeV・10W の陽子ビームを未臨界状態の臨界実験装置に導入することで ADS を模擬する「核変換物理実験施設」からなる。本稿では、主に核変換物理実験施設について、実験目的、実験項目、施設仕様等の検討状況について報告する。

#### 1. 核変換用 ADS の炉物理・核データから見た特徴

原研で提案している核変換用 ADS の概念図を図 1 に示す。熱出力 800MW で、核破砕ターゲットと炉心冷却材に鉛ビスマス（Pb-Bi）を併用するタンク型概念である。初期炉心では、燃料として MA60%、Pu40%の窒化物燃料を用いる。使用済み燃料は高温化学処理（乾式処理）で核分裂生成物を除去し、新たに MA のみを加えて

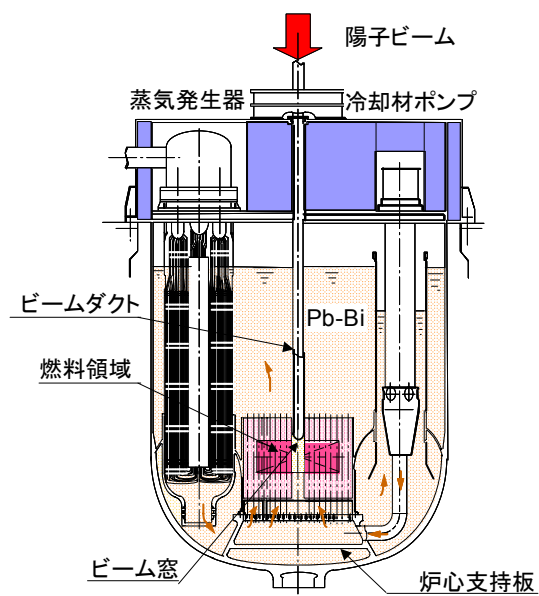


図 1 核変換用 ADS の概念 (800MW・鉛ビスマス冷却・タンク型)

再び窒化物燃料に成形して炉心に装荷する。MA の装荷量は約 2.5t であり、年間約 250kg の MA を核変換できる。

実効増倍率 ( $k_{eff}$ ) の最大値を 0.95 とした場合、第 1 サイクル燃焼初期から平衡サイクル燃焼末期にわたって 800MW の熱出力を維持するには、600MeV から 1.5GeV 程度のエネルギーで 20~30MW 程度の陽子ビームが必要となる。

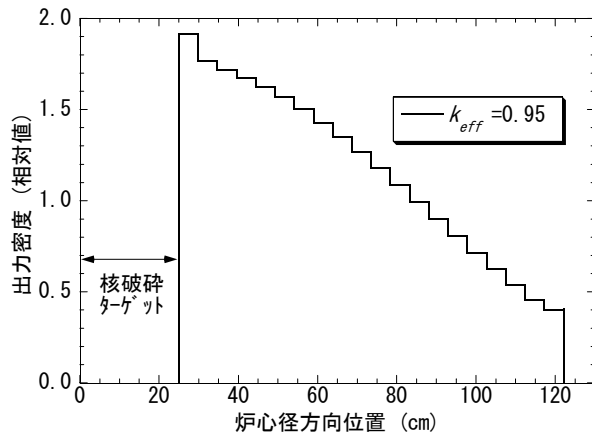


図 2 ADS の炉心径方向出力分布

ADS の炉物理的な特徴としてまず挙げられるのは、未臨界状態であることに起因する出力分布の急激な変化である。一般に、中性子源の実効的な強度を上げるために、核破砕ターゲットは炉心中心に配置するのが望ましいが、図 2 に示すように出力密度のピークがターゲット近傍に発生し、熱除去等の観点から注意が必要となる。

核破砕反応で発生する中性子の多くは 1MeV 近辺のエネルギーを有するため、従来の高速炉には存在しない高エネルギー中性子は核変換特性や出力分布に大きくは影響しないと考えられている。しかしながら、わずかに存在する高エネルギー中性子は、(n,xn) 反応等を通して中性子源強度に影響を及ぼすことや、高い透過力を持つことから遮蔽の観点では重要であること等、これまでにはない配慮が必要となる。

ADS の出力  $P$  は、次式で示すように、実効的な中性子源強度  $S$  に比例し、実効増倍率 ( $k_{eff}$ ) の 1 からの隔たり  $(1-k_{eff})$  すなわち未臨界度に反比例する。

$$P = \frac{A \cdot S}{1 - k_{eff}}$$

ここで、 $A$  は比例定数である。実効的な中性子源強度  $S$  は核破砕中性子源の中性子発生数だけでなく、空間分布、エネルギー分布、角度分布等の特性に影響される量である。また、 $k_{eff} = 0.95$  程度で運転される ADS では、 $k_{eff}$  に  $\pm 1\%$  の誤差を見込むと、出力  $P$  は約 20% の誤差を持つことになるため、注意を要する。ADS においては未臨界を維持することが安全上重要となるため、 $k_{eff}$  の監視技術も重要な開発課題である。

高速中性子系の ADS では、核分裂反応で MA を効率よく核変換することを目指す、MA の中性子捕獲反応も免れない。主要な MA である Np-237 や Am-241 は、中性子捕獲反応で核分裂性核種に変換されるため、MA のみを燃料とすると燃焼に伴って反応度が上昇し、初期の  $k_{eff}$  を相当低く設定しないと臨界に達するおそれがある。燃焼反応度変化を第 1 サイクルから平衡サイクルまで小さく抑えることを目的に、前述のように初期燃料に Pu を付加するが、燃焼反応度変化は Pu の核分裂、MA の核分裂及び中性子捕獲のバ

ランスで決まるため、現状の核データでは予測精度が不十分であると考えられる。

ADS の出力を燃焼中に一定に保つためには、燃焼反応度を何らかの方法で補償する必要がある。通常の臨界原子炉では制御棒を用いるが、ADS では陽子ビーム強度を調整することでも出力制御が可能である。図 3 に、第 1 サイクルから第 5 サイクルまでの燃焼に伴う  $k_{eff}$  の変化と、陽子ビーム強度の調整で同一出力に保つ場合の加速器出力の変化を示す。例えば第 1 サイクルでは、 $k_{eff}$  が 0.949 から 0.933 に下降するのに従って、加速器出力を約 23MW から 30MW に

徐々に上昇させる必要がある。制御棒を用いると誤操作等に起因する事故を想定する必要が生じるが、ビーム出力制御の誤操作に関しては、体系が未臨界であればそれほど大きな問題を生じるおそれがないと考えられる。

以上に述べたように、炉物理・核データの観点からの核変換用 ADS に関する研究開発課題は以下の 4 点にまとめられる。

- ① 核破砕中性子源の空間分布及び未臨界度に起因する出力分布の特異性
- ② 遮蔽や中性子源強度の観点からの高エネルギー粒子の影響
- ③ 実効中性子源強度及び未臨界度の予測精度評価及び監視技術開発
- ④ 燃焼反応度の予測精度評価及び燃焼反応度の補償方法開発

核変換物理実験施設は主に上記の課題に取り組むことを目的にする。

## 2. 核変換物理実験施設の概要

図 4 に、J-PARC 施設の配置概念を示す。線形加速器（リニアック）からは、400MeV×0.33mA の負イオン水素（ $H^-$ ）が 50Hz・パルス幅 0.5ms で供給される。50Hz の内、25Hz は 3GeV シンクロトロンでさらに加速・短パルス化され、物質・生命科学実験施設に導かれる他、50GeV シンクロトロンにも導かれ、原子核・素粒子実験に供される。残りの 25Hz は、超伝導線形加速器で 600MeV まで加速した後、核変換実験施設に供給さ

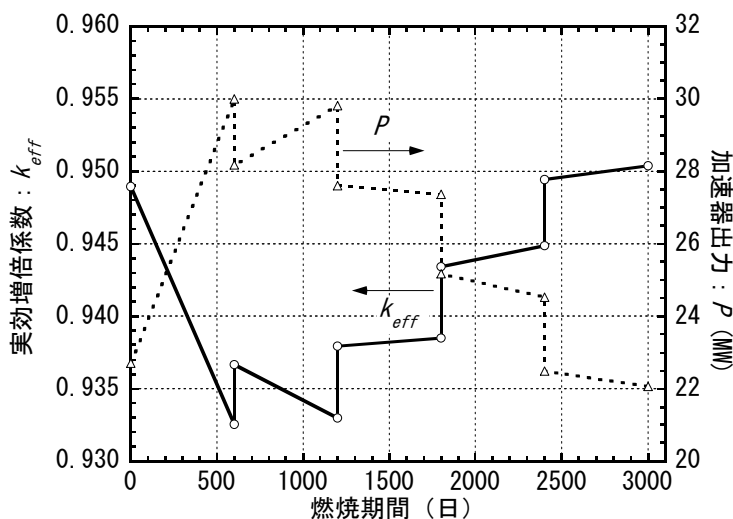


図 3 燃焼に伴う実効増倍係数の変化とそれを補うための加速器出力の変化の例  
(燃料交換は 600 日毎に行う)

れる計画である。

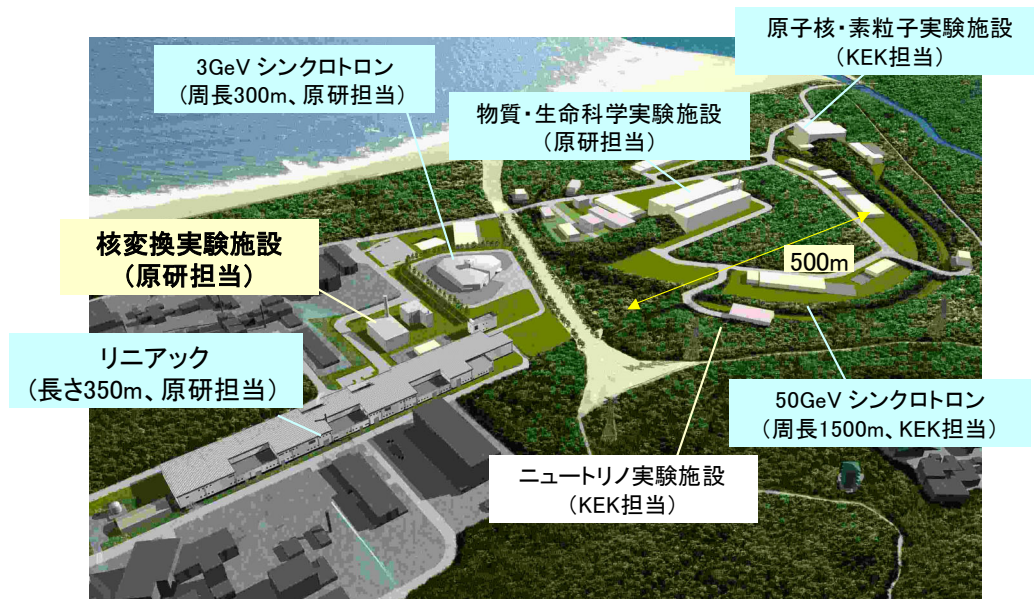


図 4 J-PARC の全体配置計画

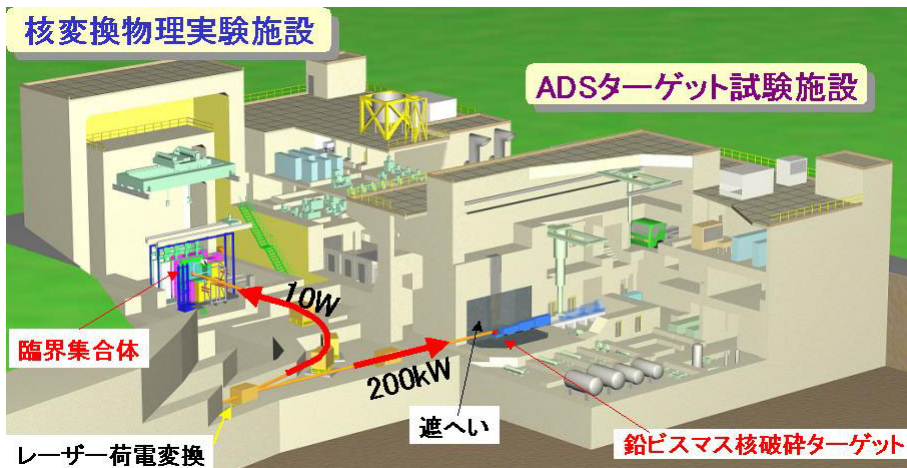


図 5 核変換実験施設の概念図

核変換実験施設の概念を図 5 に示す。 $600\text{MeV} \times 0.33\text{mA} = 200\text{kW}$  の陽子の大半は ADS ターゲット試験施設に導かれ、一部（最大 10W）が核変換物理実験施設に導入される。10W 程度の陽子の抽出には、図 6 に示したようにレーザービームによる陽子の荷電変換を用いる。レーザーの出力と照射時間を調整することで、同じ 10W ビームでも、10ns 程度の短パルスから、0.5ms の長パルスまでを供給できることが特徴である。 $600\text{MeV} \cdot 10\text{W}$  の陽子を重金属ターゲットに当てた場合、核破砕中性子源の強度は、 $1.5 \times 10^{12}$  n/s 程度であり、中性子増倍係数が 0.90 程度の深い未臨界状態においても、精度良く各種の測定ができる。但し、陽子ビーム導入が可能なのは  $k_{\text{eff}}$  が 0.98 以下の体系に制限することを考えている。

核変換物理実験施設の中心となる臨界実験装置は、原研に既存の高速炉臨界実験装置 FCA と同様の「水平 2 分割型」とする。5cm×5cm の正方断面の格子管が 51 行×51 列に積み上げられて集合体を形成し、それが固定側と移動側の 2 つ用意される。燃料は板状で引き出しに装填し、その引き出しを格子管に装荷する。実験に際しては、移動側集合体が固定側に近付いていく構造であり、最終的に両者は密着して運転する。

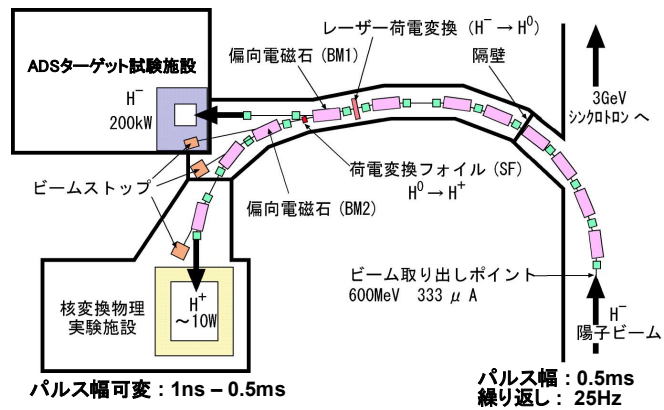


図 6 レーザー荷電変換によるビーム抽出の概念

実用型 ADS は未臨界で運転されることから、核変換物理実験施設を臨界状態とできない「核燃料使用施設」とするか、臨界状態とできる「原子炉施設」とするかを検討した。その結果、実験できる未臨界状態の範囲が広く取れ、臨界状態を使った参照実験で実験精度を飛躍的に高めることができる原子炉施設として設置することとした。

次節では、核変換物理実験施設を用いた実験について考察する。

### 3. 核変換物理実験施設で行う実験

1 節で述べた 4 つの課題に取り組むために、次の 3 種類の実験を実施する。

- ① 核破砕中性子源と高速中性子増倍体系を組み合わせた炉物理実験
- ② MA と長寿命核分裂生成物 (LLFP) の核変換特性に関する炉物理実験
- ③ 加速器による未臨界体系の運転制御に関する実験

#### 3.1 核破砕中性子源と高速中性子増倍体系を組み合わせた炉物理実験

##### (1) 未臨界体系における出力分布

中性子源を未臨界体系に置いた場合、出力分布は臨界時のものからずれたものとなる。特に、核破砕中性子源の空間・エネルギー分布は出力分布に大きく影響を及ぼす。実験では、 $k_{eff}$  を様々に変え、箔及び核分裂計数管を用いた測定や  $\gamma$  スキャンニング法等により出力分布を測定し、特にターゲット近辺における出力ピークの予測精度を評価する。さらに、出力平坦化をねらった多領域炉心を組み、その効果を検証する。

## (2) 未臨界度の決定

システムの未臨界を担保するだけでなく、システムの出力決定に影響する未臨界度の精度の良い予測及び測定は、ADS システムにとって最も重要な事項である。実験では、修正中性子源増倍法、パルス中性子法、中性子源引き抜き法などの様々な測定手法により、燃料装荷作業時、運転停止時、運転時の各場合における未臨界度測定技術の確立を図る。未臨界度の測定に必要な実効遅発中性子割合 $\beta_{eff}$ や即発中性子寿命 $\Lambda$ も測定で求める。 $\beta_{eff}$ は Cf 中性子源法で、 $\Lambda$ はパルス中性子法で測定することができる。

## (3) 中性子源の実効強度

核破碎中性子源の空間・方向・エネルギー分布を考慮した中性子源の実効強度を測定する。実験は、非増倍体系での中性子源強度の絶対測定と未臨界体系（Cf-252 及び核破碎中性子源）での絶対出力測定及び未臨界度測定を組み合わせで行う。未臨界度を系統的に変化させて測定することにより、実験結果の信頼性向上を図る。

## (4) 高エネルギー中性子の影響

高エネルギー中性子に感度を持つ放射化反応を用いて中性子束の空間分布を測定する。また、加速器から供給される短パルスの陽子ビームを使って TOF 法による中性子スペクトルの測定を行う。

## (5) その他の ADS の炉物理実験

炉心中心軸上のターゲット、ビーム窓、ビーム輸送管内のボイド等の構造は ADS 特有のものであり、実効増倍率や出力分布の予測精度に大きく影響を及ぼすと考えられる。実験ではこれらの構造を臨界体系に置いた場合と置かない場合で実効増倍係数、出力分布等の核特性予測精度に対する影響を評価する。また、未臨界体系でターゲット及びビーム窓の位置を移動し、実効中性子源強度及び出力分布への影響を評価する。さらに、ADS の実プラントにおいてビーム窓が破損して液体ターゲットがビーム輸送管に侵入する事故を模擬し、反応度の変化を測定する。

ADS の冷却材としては鉛-ビスマスが第 1 候補として考えられている。鉛-ビスマスを用いた場合の中性子スペクトルの予測精度及び冷却材ボイド反応度の予測精度の評価を、臨界体系を用いた実験で実施する。

## 3.2 MA と LLFP の核変換特性に関する炉物理実験

### (1) MA の核変換率測定

Np-237、Am-241、Am-243、Cm-244 などの核分裂率を核分裂計数管及び箔により測定し、これらの核種の核データの積分評価に資すると共に、核分裂による核変換率の予測精度

を評価する。未臨界体系及び臨界体系の両方で測定し、予測精度の比較・検討を行う。

## (2) MA、LLFP のサンプル反応度値測定

核データの積分テストとして、上記 MA に加えて Tc-99、I-129 等のサンプル（10g 程度）を用意し、反応度値を測定する。中性子束のエネルギー分布を系統的に変化させて測定を行う。

## (3) LLFP 用減速領域付き体系の核特性

LLFP の効率的な核変換のためには高速中性子を減速する必要があるが、このような減速材付き集合体が周りの燃料の出力分布に影響を及ぼす恐れがある。実験では未臨界体系及び臨界体系で模擬減速領域を設け、出力分布や LLFP の反応率の測定を行い、影響を実験的に確かめる。

## (4) MA 燃料装荷炉心の模擬

核変換プラントで用いる予定の MA 窒化物燃料を模擬した領域を構築し、未臨界度、出力分布、動特性パラメータ等の核特性の予測精度を評価する。臨界システムか加速器駆動未臨界システムかによらず、MA を装荷した核変換システムを構築するためには、臨界実験装置による核特性予測精度の検証が不可欠である。核変換物理実験施設を放射線強度が強く発熱も大きな MA を取り扱うことのできる

施設として設計することは、核変換技術の研究・開発を進める上で非常に重要である。

現在、図 7 に示したように炉心中心の 5×5 格子管をピン状燃料装荷ターゲットの周りに MA 含有ピン状燃料装荷領域を設け、核変換を目的とした実用型 ADS の特性を部分的に模擬することを検討中である。

表 1 に、28cm×28cm×60cm の領域に様々なピン状模擬燃料を装荷した場合の発熱率及び放射線（ガンマ線・自発核分裂中性子）の発生率の試算結果を示す。MOX 高速炉の模擬は、FCA と同様の除熱設備及び放射線遮蔽によって十分に実験可能なレベルである。5%MA 添加 MOX 高速炉の模擬炉心では、MOX 高速炉に比べて発熱で 2 倍程度、 $\gamma$ 線が 10 倍以上となるため、冷却装置の増強と、燃料取り扱い時の遠隔操作設備の設置が必要

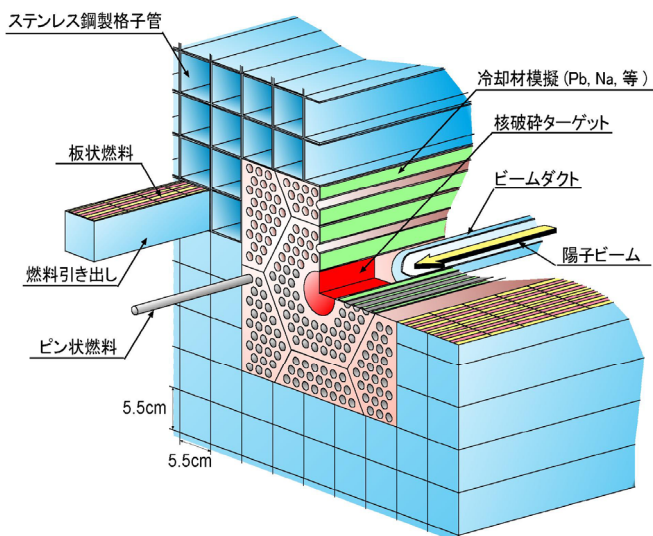


図 7 核変換物理実験施設の集合体概念

表 1 MA 燃料部分装荷実験時の発熱と放射線発生率

模擬対象	Pu, MA 組成	28cm×28cm×60cm 装荷時		
		発熱 (W)	γ線 (γ/s)	中性子 (n/s)
MOX 高速炉 <sup>a)</sup>	UO <sub>2</sub> 取出し <sup>d)</sup>	$7.1 \times 10^2$	$3.1 \times 10^{13}$	$7.5 \times 10^6$
5%MA 添加 MOX 高速炉 <sup>b)</sup>	UO <sub>2</sub> 取出し <sup>d, f)</sup>	$1.1 \times 10^3$	$3.2 \times 10^{14}$	$7.1 \times 10^6$
	MOX 取出し <sup>e, g)</sup>	$1.5 \times 10^3$	$5.3 \times 10^{14}$	$9.5 \times 10^6$
(MA+Pu+Zr) 窒化物 <sup>c)</sup>	UO <sub>2</sub> 取出し <sup>d, f)</sup>	$1.6 \times 10^3$	$8.3 \times 10^{14}$	$3.4 \times 10^6$
	MOX 取出し <sup>e, g)</sup>	$2.6 \times 10^3$	$1.5 \times 10^{15}$	$4.5 \times 10^6$
	MOX 取出し (Cm 入り) <sup>e, h)</sup>	$1.3 \times 10^4$	$1.3 \times 10^{15}$	$1.5 \times 10^{10}$

a) Pu:U = 17:83 燃料体積割合=50.6%      b) MA:Pu:U = 5:16:79 燃料体積割合=50.6%  
 c) MA:Pu:Zr = 23:12:65 燃料体積割合=22.9%      d) Pu = 65% fissile  
 e) Pu = 55% fissile      f) <sup>237</sup>Np:<sup>241</sup>Am:<sup>243</sup>Am = 50:36:14  
 g) <sup>237</sup>Np:<sup>241</sup>Am:<sup>243</sup>Am = 5:63:32      h) <sup>237</sup>Np:<sup>241</sup>Am:<sup>243</sup>Am:(<sup>244+245</sup>Cm) = 4:53:28:14

となる。ADS に装荷する予定の (MA+Pu+Zr) 窒化物燃料 (Cm なし) では、発熱で 3 倍、γ線で 50 倍程度となるが、実施可能なレベルであると考えている。しかしながら、Cm を含んだ燃料では中性子発生率が 3 桁以上も増加するため、過大な遮蔽を要することが懸念される。

### (5) MA 及び LLFP の断面積測定

レーザー荷電変換で 1~10ns 程度のパルス幅の陽子が供給できれば、核破碎ターゲットで中性子を発生させて、中性子飛行時間法 (TOF 法) を用いた断面積測定が可能となる。パルス幅 10ns 時で  $6 \times 10^{10}$  n/pulse の中性子が 25Hz で供給される。飛行距離を 5m とすると、パルス幅に起因するエネルギー分解能の限界は、1MeV 中性子で 6%程度となる。但し、核破碎中性子源は体積線源となるため、飛行距離に広がりが生じることに注意を要する。

また、核変換物理実験施設に向かう 10W ビームラインとは別に強力なビーム取り出し機構を設け、断面積測定に供することも可能である。但し、施設の配置上の制約は大きい。

## 3.3 加速器による未臨界体系の運転制御に関する実験

### (1) ビーム出力の調整によるフィードバック制御

未臨界実験体系に入射するビーム出力を制御し、加速器駆動未臨界システムの安定な運転を試みる。実用 ADS の基本概念では加速器のイオン源で陽子ビーム出力を制御することを考えているが、本実験計画では他施設への影響を避けるために加速器から供給されるビームを施設内のビーム出力制御装置を用いて調整する。



## (2) ビームトリップ時及び立ち上げ時の挙動

ビームトリップが発生したときには炉出力は急激に低下し、再びビームが入射されると急速に元の炉出力に戻る。このような事象は実際の ADS プラントでは炉心材料に熱衝撃・疲労を与えるため好ましくない。そこで、ビームトリップ後の再立ち上げ時を模擬した最適な制御ロジックを構築し、その検証のための運転を行う。

## (3) エネルギー増倍率の決定

加速器によって投入したエネルギーと核分裂エネルギーとして回収できるエネルギーの比を「エネルギー増倍率」と定義する。エネルギー増倍率は加速器駆動システムの基本的な特性量である。これをビーム出力の絶対測定及び核分裂率の絶対測定から実験的に求める。

## おわりに

現在、臨界実験装置としての安全性検討、レーザー荷電変換技術の検証実験、高精度格子管の試作、パルス系核計装の検証のための FCA におけるパルス中性子実験等を実施中又は計画中である。今後、国による分離変換技術の研究開発の進め方に関するチェック・アンド・レビューを経て、原研とサイクル機構との統合後に、建設に着手したいと考えている。

核変換実験施設は、J-PARC の中で原子力分野を中心に実験できる唯一の施設であり、原子力分野における加速器利用、MA 及び LLFP 核変換、Pu 利用に関する実験を幅広く行える施設にすべきであると考えます。炉物理・核データの面から、より充実した施設とするために、多くの方々からの施設検討への積極的な参画を期待しています。