

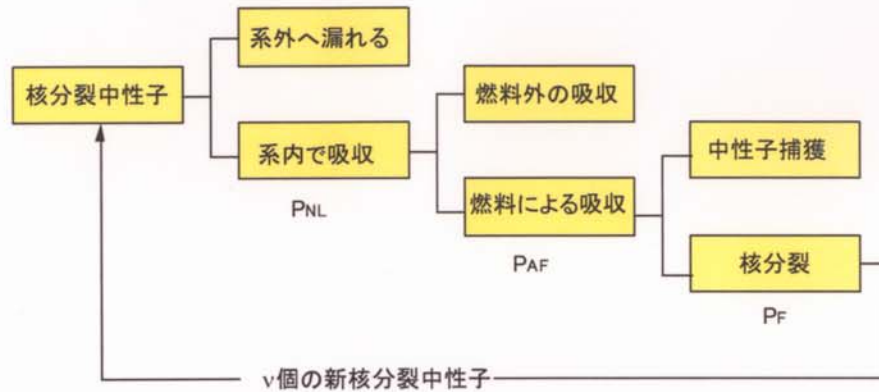
ADS とは

柴田徳思

高エネルギー加速器研究機構

1. 体系内での中性子
2. エネルギー増幅
3. 長半減期核種の消滅
(大強度陽子加速器施設における
計画 原研 大井川)

1. 体系内での中性子



P_{NL} : 核分裂中性子が系から漏れずに系内で吸収される割合

P_{AF} : 系内で吸収された中性子の内核燃料に吸収される割合

P_F : 核燃料に吸収された中性子の内核分裂を引起こす割合

このうち P_{AF} , P_F は

$$P_{AF} = \frac{\Sigma_a^F}{\Sigma_a^F + \Sigma_a^R}$$

Σ_a^F : 核燃料のマクロ吸収断面積

Σ_a^R : 核燃料以外の物質のマクロ吸収断面積

$$P_F = \frac{\Sigma_f^F}{\Sigma_a^F} = \frac{\sigma_f^F}{\sigma_a^F} = \frac{\sigma_f^F}{\sigma_f^F + \sigma_c^F}$$

σ_a^F : 核燃料物質のミクロ吸収断面積

σ_f^F : ミクロ核分裂断面積

σ_c^F : ミクロ捕獲断面積

中性子増幅率 k

$$k = \frac{\text{ある世代の中性子数}}{\text{1世代前の中性子数}} = \frac{\text{炉内での中性子生成率}}{\text{炉内での中性子損失率}} = \frac{P(t)}{L(t)}$$

ある世代の中性子数 N_2 は

$$N_2 = \nu P_F P_{AF} P_{NL} N_1$$

ν は核分裂により発生する平均の中性子数

$$k = \frac{N_2}{N_1} = \nu P_F P_{AF} P_{NL} = \eta f P_{NL}$$

ここで $\eta = \nu P_F$ (1 個の中性子を吸収して分裂により発生する中性子数), $f = P_{AF}$ (利用率)

無限大の体系では $P_{NL}=1$ 、このとき

$$k_{\infty} = \eta f$$

体系内での中性子束 ϕ

$$D\nabla^2\phi - \Sigma_a\phi + S = 0$$

D: 拡散係数

Σ_a : マクロ吸収断面積

S: 中性子生成項

中性子生成項は

$$S = \nu\Sigma_f\phi + C$$

C: 外から加えられる中性子

外からの供給がないと

$$\nabla^2\phi + \left(\frac{k_\infty - 1}{L^2}\right)\phi = 0$$

ここで $L^2 = D/\Sigma_a$ (L: 中性子拡散距離) とおいた。

現実の体系で臨界となるには $k_\infty > 1$ であるので

$$\nabla^2\phi_n + B^2\phi_n = 0$$

平板体系では $f = A\cos Bx$

未臨界では $k_{\infty} < 1$ として

$$\phi = e^{-|B|x}$$

となり、指数関数的に減る分布となる。

未臨界系で中性子及び核反応の総数

始めの中性子数を N_0 とすると総中性子数は

$$N_n = N_0(1 + k + k^2 + k^3 + \dots) = \frac{N_0}{1 - k}$$

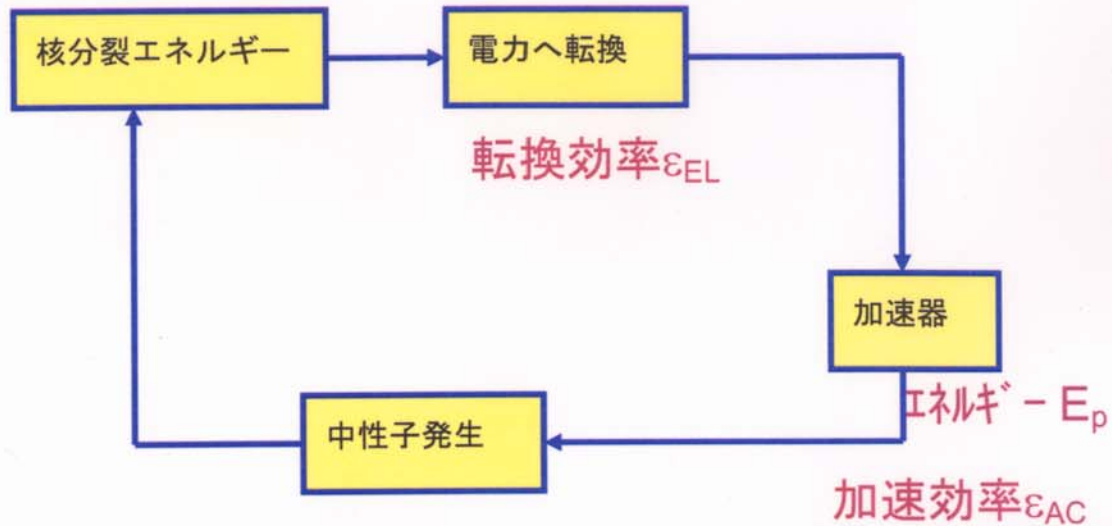
核分裂で発生する中性子数を ν とすると、核分裂の総数 N_f は

$$N_f = \frac{N_n - N_0}{\nu} = \frac{N_0 k}{(1 - k)\nu}$$

未臨界体系へ外から中性子を加えるときは体系内のスペクトルを異なるので、実効的な中性子数で置きかえこの換算係数を ξ として

$$N_f = N_0 \xi \frac{k}{(1 - k)\nu}$$

2. エネルギー増幅



エネルギー増幅率 G_E

$$G_E = \frac{N_f Q_f \varepsilon_{AC} \varepsilon_{EL}}{E_p}$$

N_f : 総核分裂数

Q_f : 核分裂エネルギー

ここで総核分裂数 N_f は陽子 1 個当たり

$$N_f = N_0 \xi \frac{k}{(1-k)\nu}$$

例として 1GeV の陽子ビームを鉛ターゲットへ打ちこむとする。

N_0 : ターゲットで発生する中性子数 $N_0 \sim 20$ 。

ξ : 簡単のため $\xi = 1$ とする。

k : 例えば $k = 0.96$ とする。

ν : ^{233}U として $\nu = 2.5$ 。

Q_f : 核分裂のエネルギーとして $Q_f \sim 200\text{MeV}$ 。

ε_{ACC} : 現状の加速器で $\varepsilon_{\text{ACC}} \sim 3\%$ 。

E_p : 陽子エネルギー $E_p = 1\text{GeV}$

ε_E : 系の温度によるが現在の軽水炉程度として

ε_E

$\sim 30\%$ 。

これより、 $N_f = 192$ 、 $G_E = 0.35$ となり、エネルギー増幅はできない。

3. 長半減期核種の消滅

消滅できる数 N_I は

$$N_I = N_S + N_f$$

N_S : 陽子により直接破砕される数

N_f : 核分裂の総数

例 1GeV 陽子で消滅するとき

$$N_S: \sim 5$$

$$N_0: \sim 40 \text{ (マイクロナイトをターゲットとして)}$$

$$\xi: \text{簡単のため } 1 \text{ とする}$$

$$k = 0.9$$

$$v = 2.9$$

で $N_I \sim 129$ となる。

1mA で消滅できる数 N_T は

$$N_T = 2.5 \times 10^{25} \text{ y}^{-1} \text{ mA}^{-1} = 10 \text{ kg (MA)} \text{ y}^{-1} \text{ mA}^{-1}$$

軽水炉 1 基当たり 30kg/y の MA が生成されるので 10 基分を消滅しようとする と 30mA 必要となる。このときのビーム出力は 30MW である。

核分裂総数 N_f より得られるエネルギー P は

$$P = I_p Q_f N_f$$

$I_p = 30\text{mA}$ 、 $Q_f = 200\text{MeV}$ として $P = 740\text{MW}$ を得る。

加速効率が 3%だと 22MW で必要な電力を供給できない。

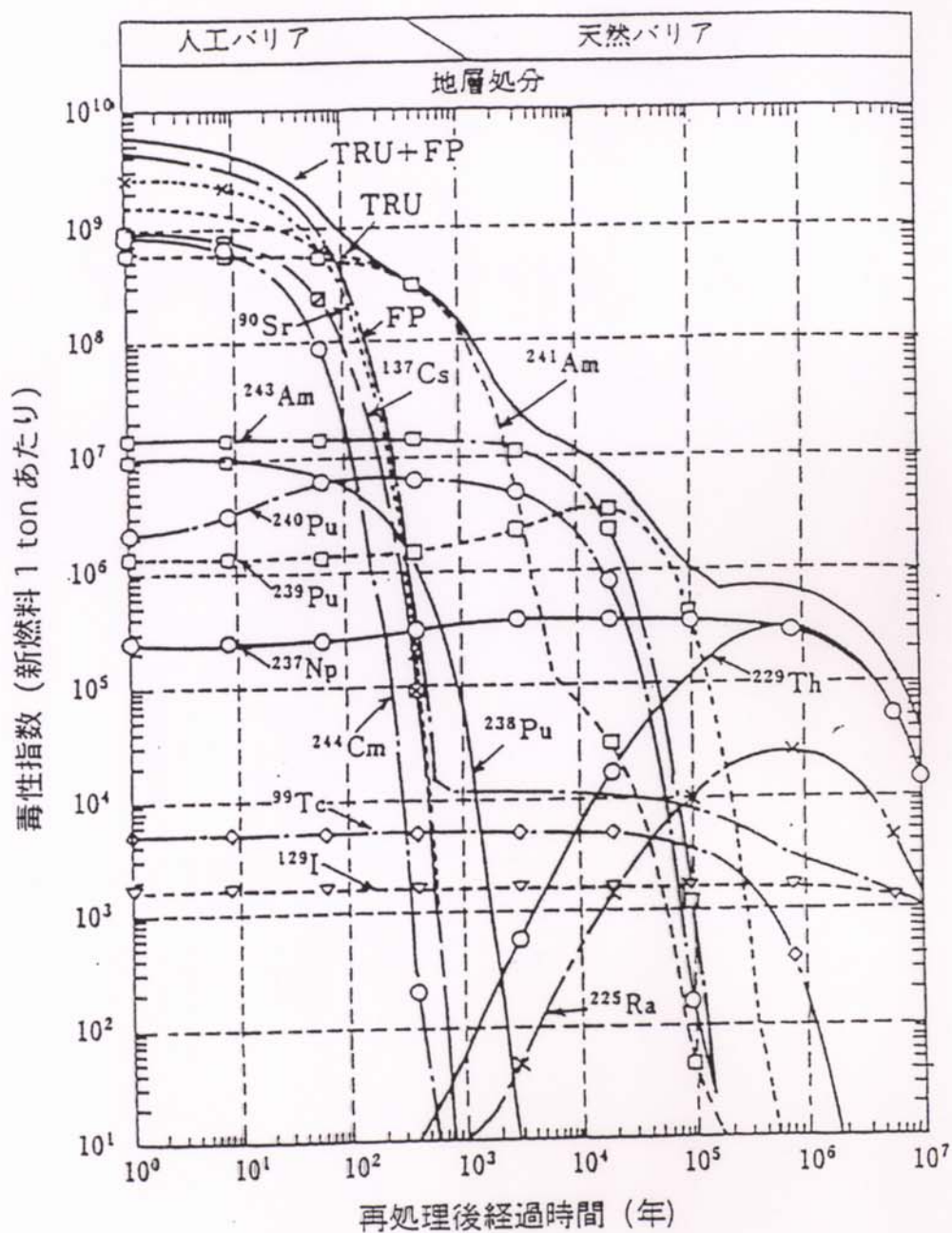


図 6 高レベル放射性廃棄物の毒性の時間依存性

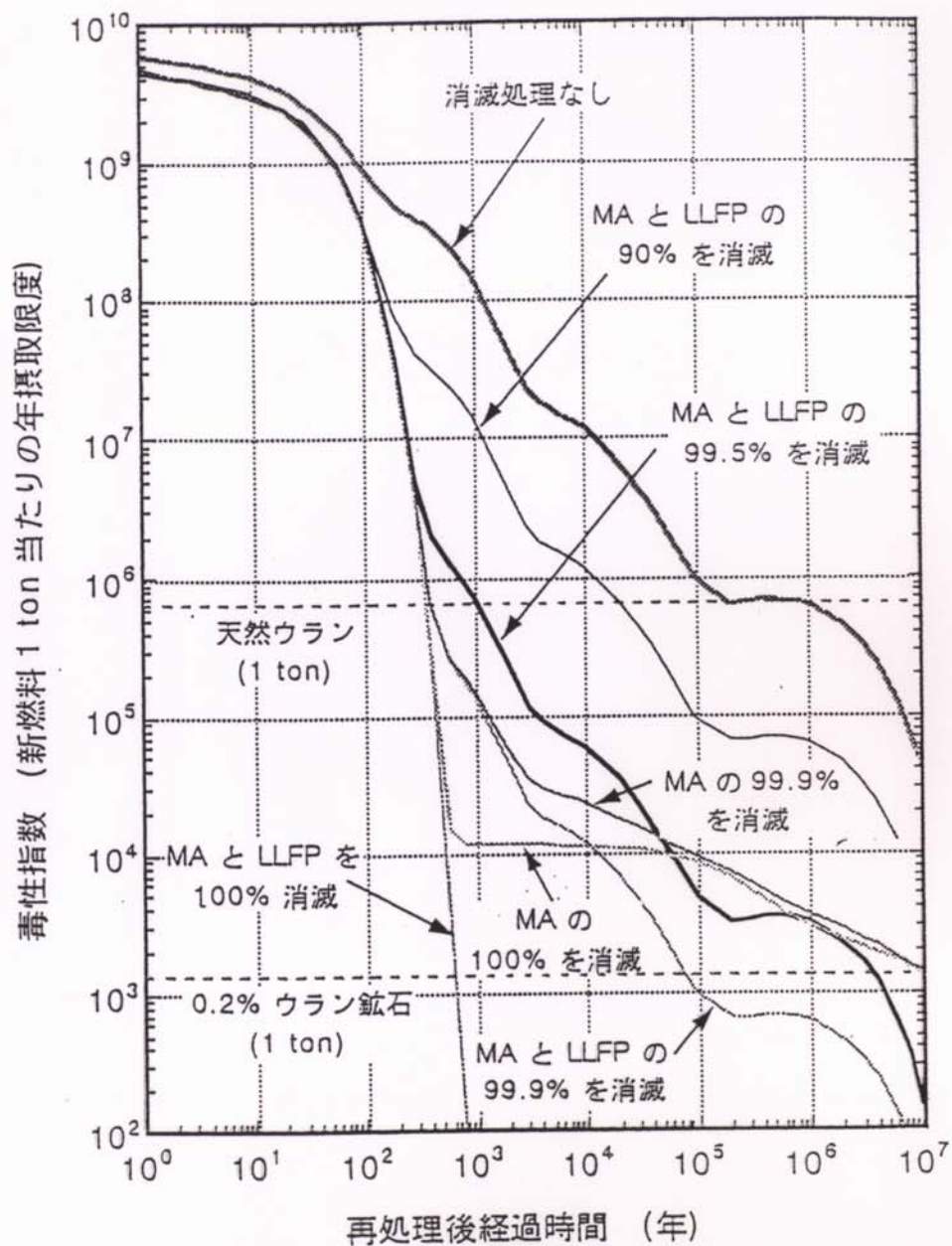


図 7 消滅処理による高レベル放射性廃棄物の毒性の減少
核分裂生成物として半減期 30 年以上を対象とした。
使用済み燃料は燃焼度 33GWd/t で 3 年冷却後を想定
再処理過程で U、Pu の回収率は 99.9%を仮定した。

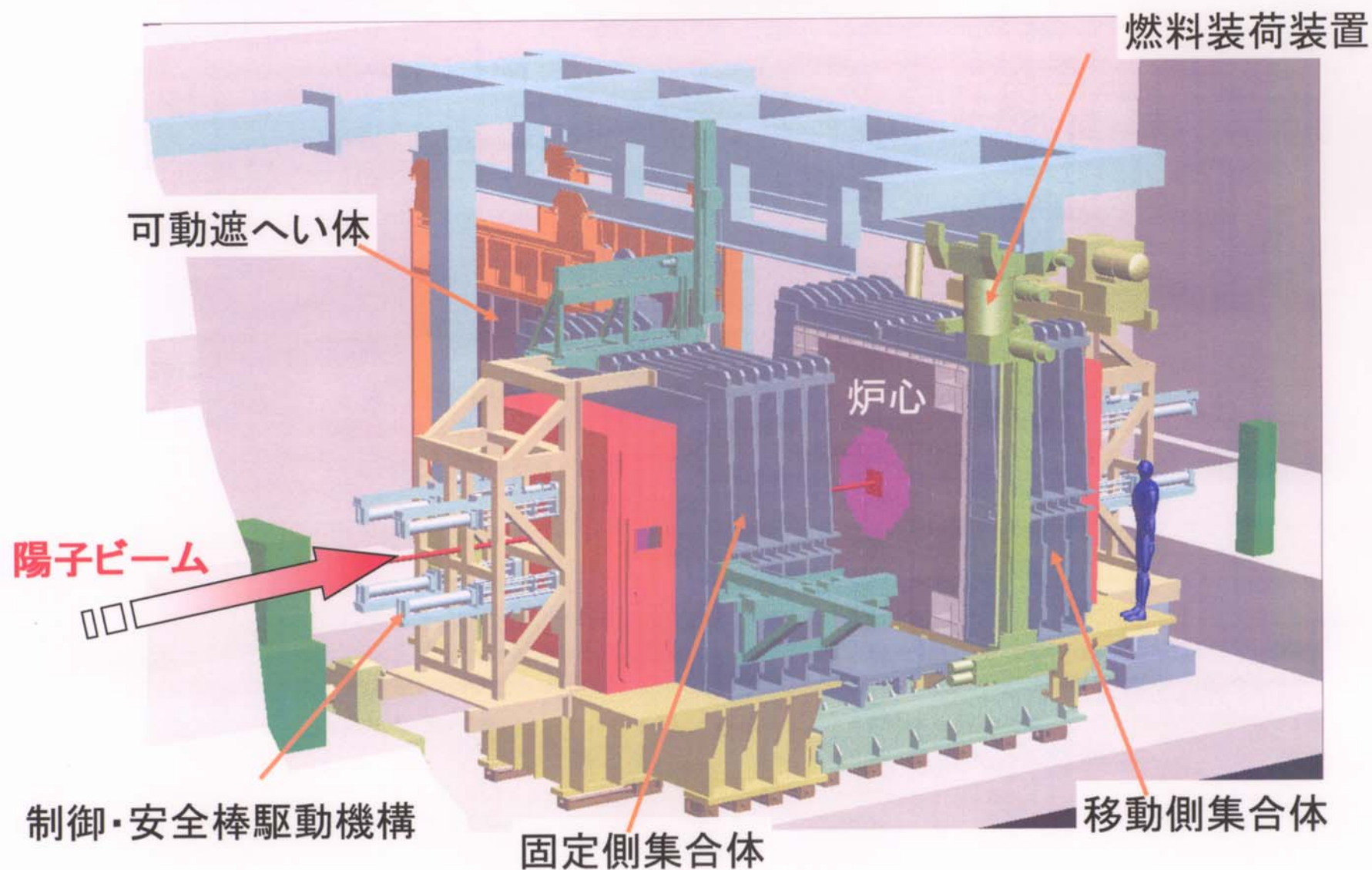
核変換実験施設 概念図

核変換物理実験施設

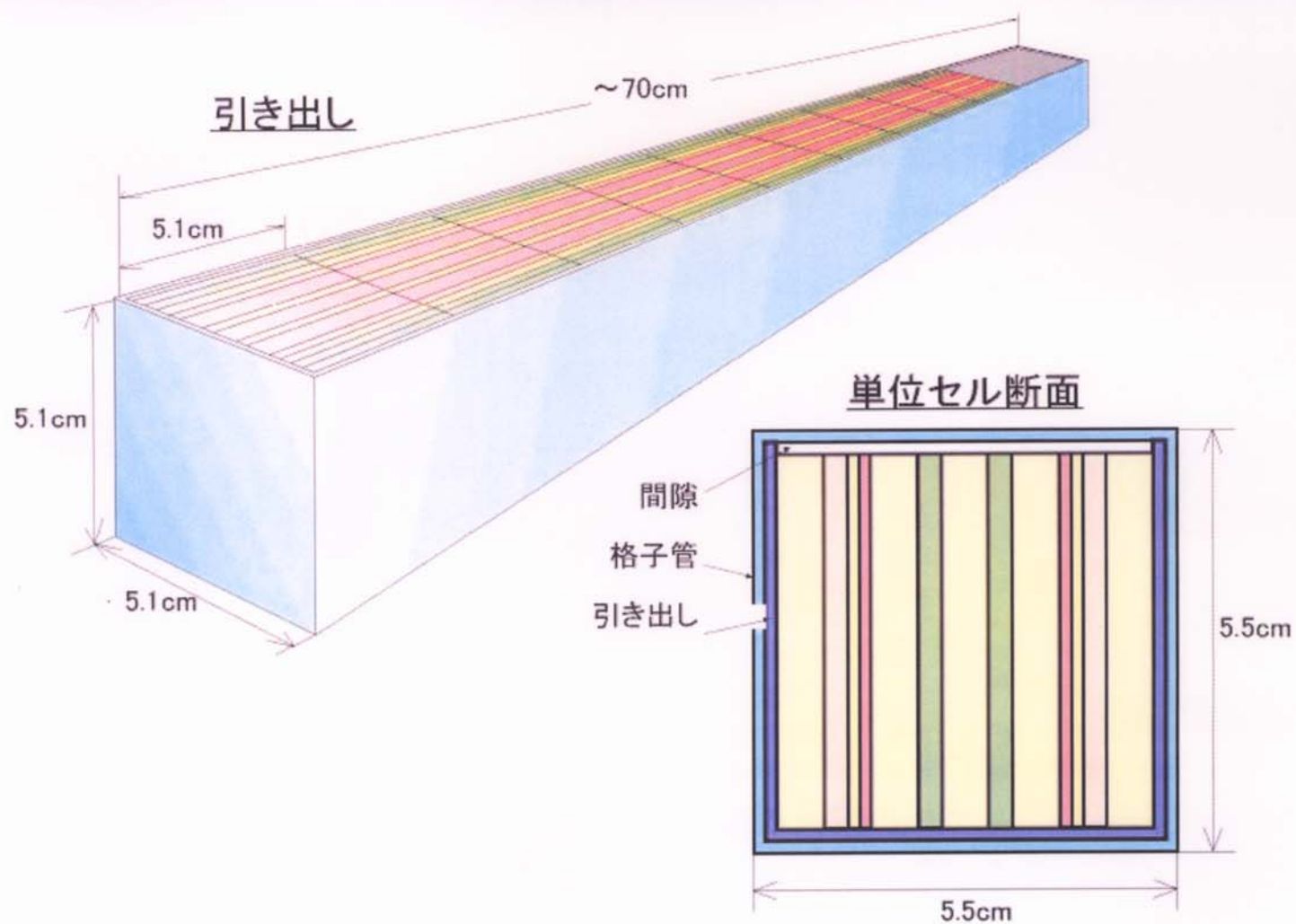
ADSターゲット試験施設



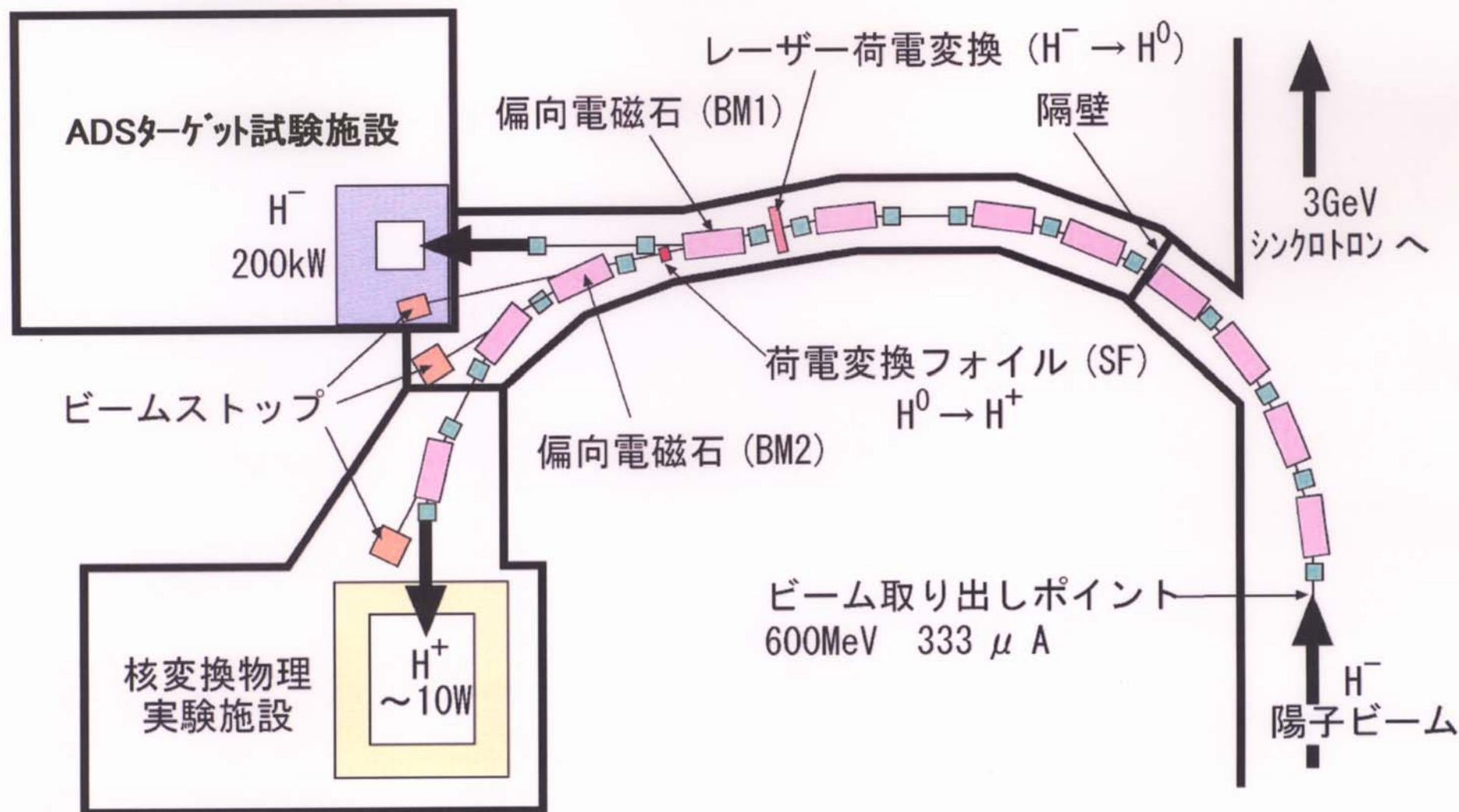
核変換物理実験施設 概念図



核変換物理実験施設 (燃料引き出し)

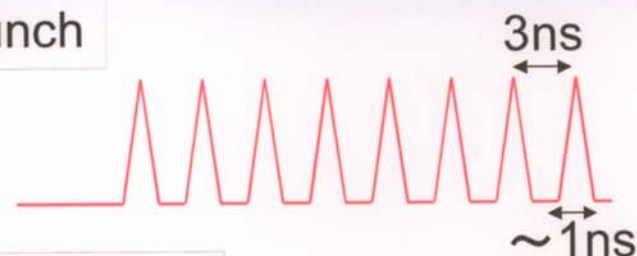


陽子ビーム導入機構

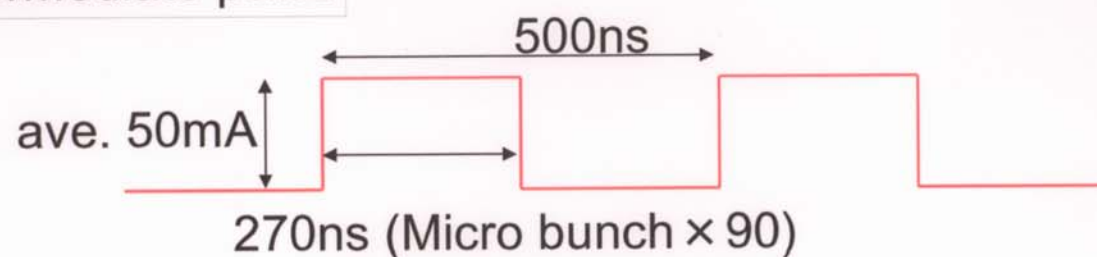


陽子ビームの時間構造

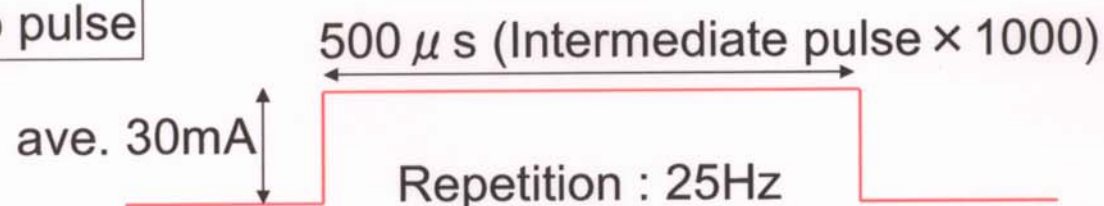
Micro bunch



Intermediate pulse



Macro pulse



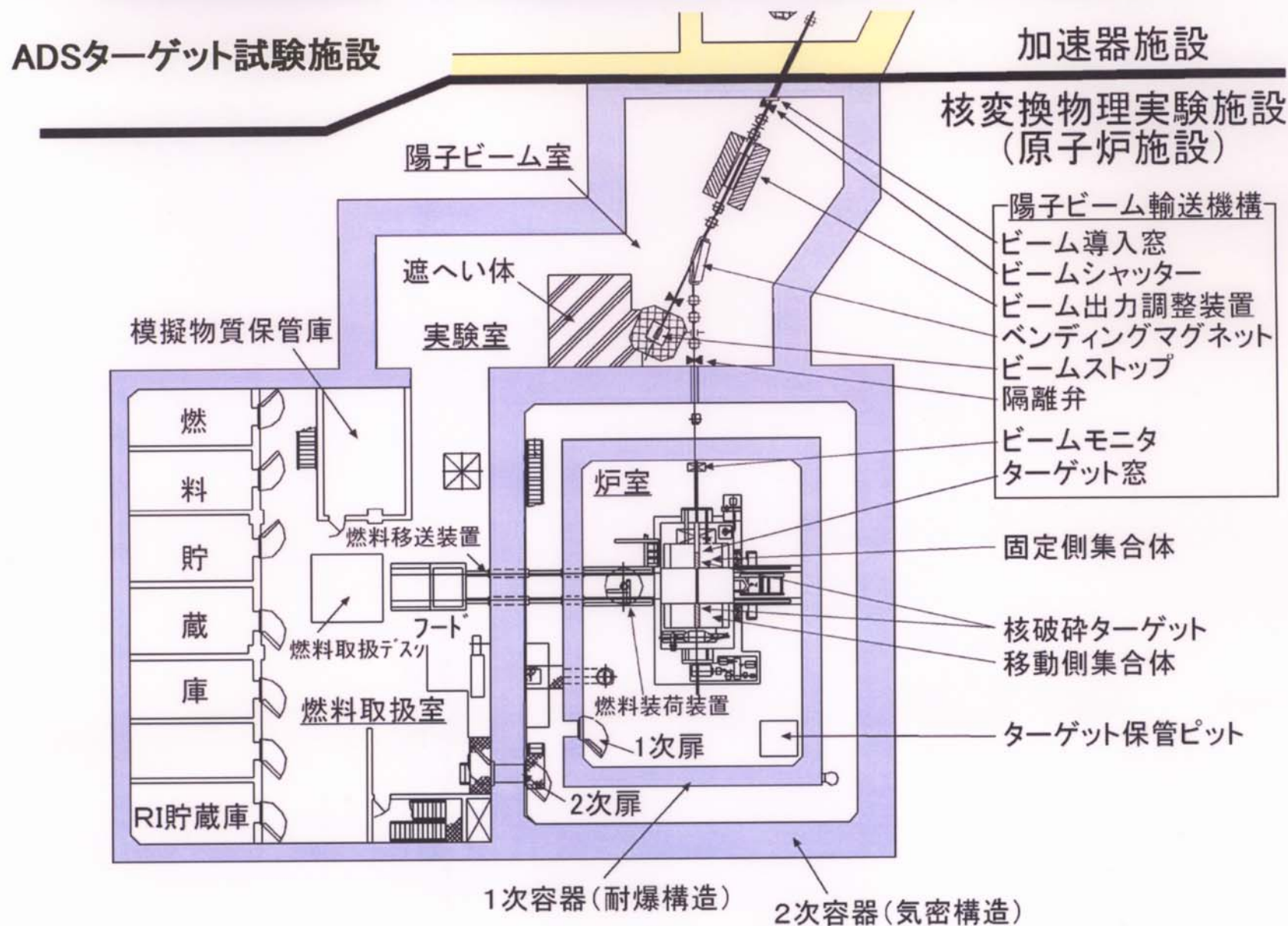
レーザー荷電変換の特徴:

レーザーのパルス幅と出力を調整することで、同じ10W陽子ビームでも

- 10ナノ秒幅の**短パルス**(パルス実験、断面積測定)
- 500ミリ秒幅の**長パルス**(疑似CW実験)

が作り出せる。

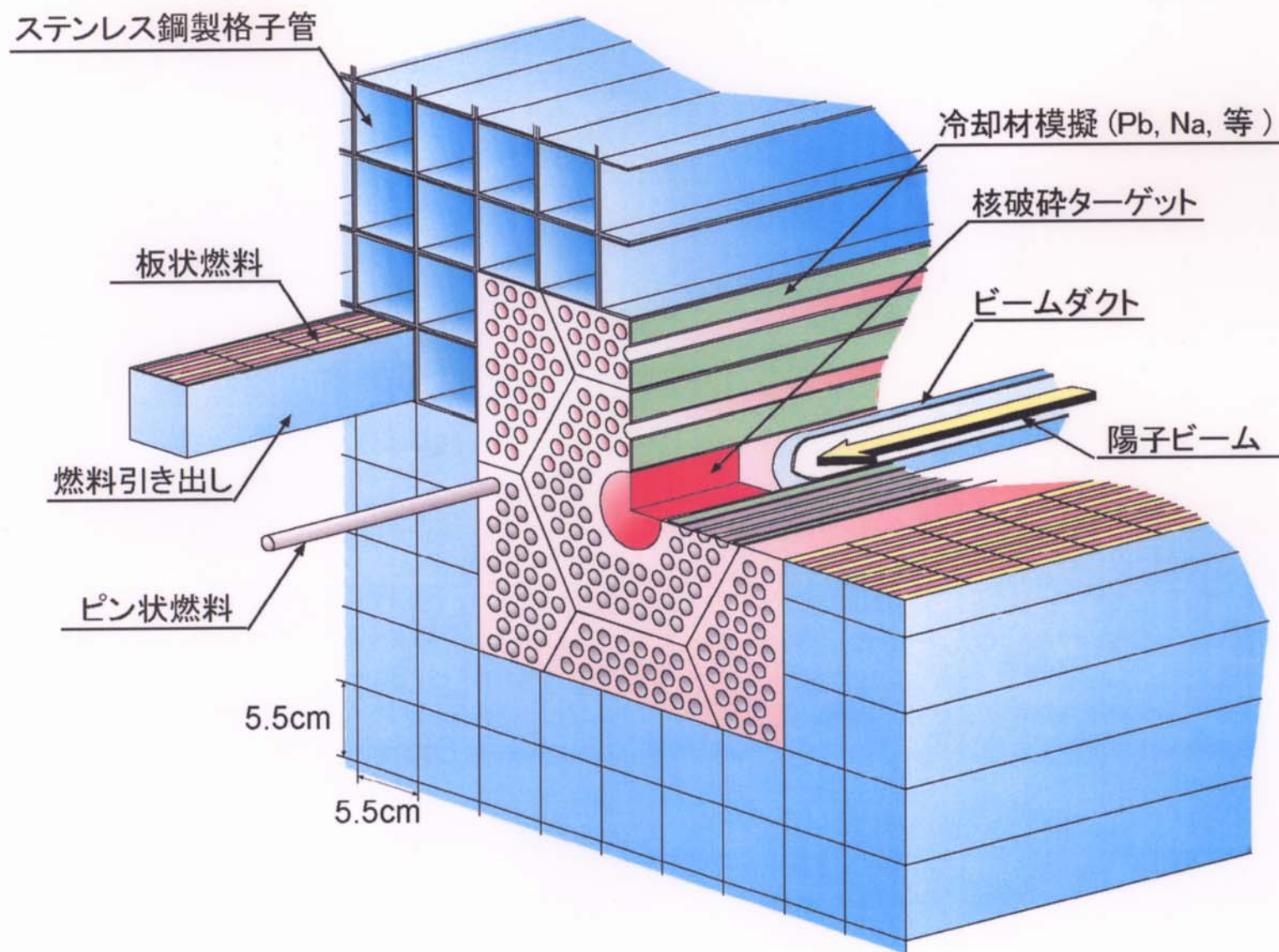
核変換物理実験施設 地下1階見取り図



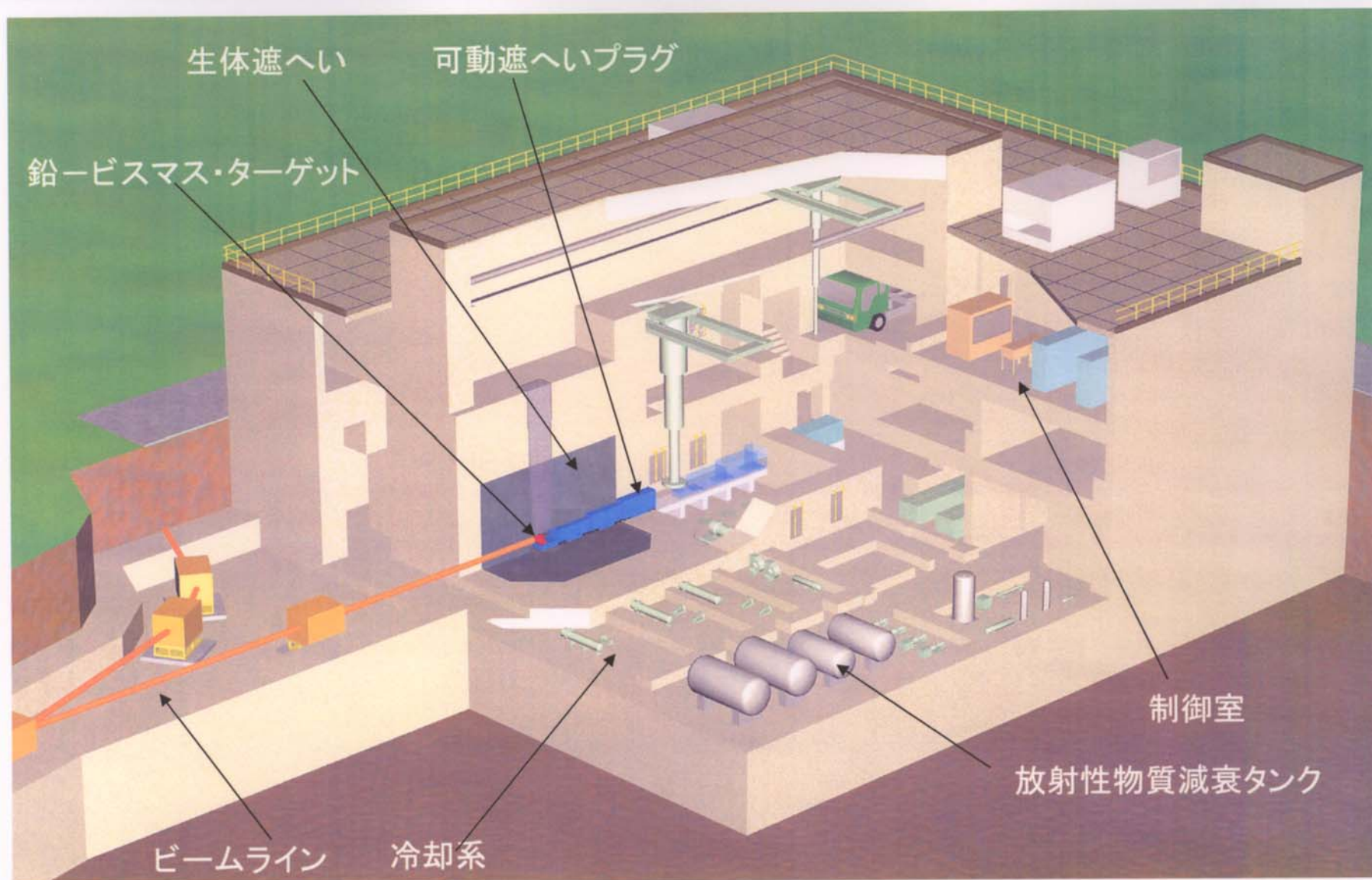
核変換物理実験施設での研究開発課題

研究・開発の目的	研究・開発課題
核破碎中性子源で駆動される高速未臨界体系の核特性予測精度評価	未臨界体系における出力分布
	未臨界度の決定
	中性子源の実効強度
	高エネルギー中性子の影響
	ターゲット、ビーム窓、ボイドの存在
	鉛-ビスマス冷却材の模擬
加速器駆動ハイブリッドシステムの運転・制御性検証	ビーム出力の調整によるフィードバック制御
	ビームトリップ時及び立ち上げ時の挙動
	温度係数の測定(炉心、ターゲット)
	出力振動、炉心のデカップリング
	エネルギー増倍率の決定
MA及びLLFPの核変換特性評価	MAの核変換率測定
	MA、LLFPのサンプル反応度価値測定
	LLFP用減速領域付き体系の核特性
	パルス中性子を用いた断面積測定
	MA窒化物燃料部分装荷炉心によるADS模擬実験

MA窒化物燃料部分装荷炉心 概念図

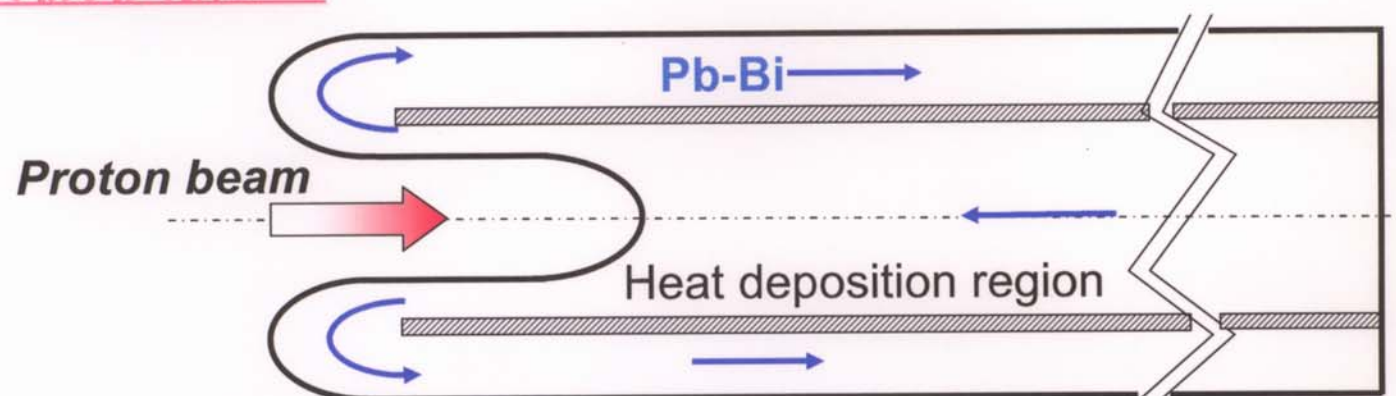


ADSターゲット試験施設 概念図



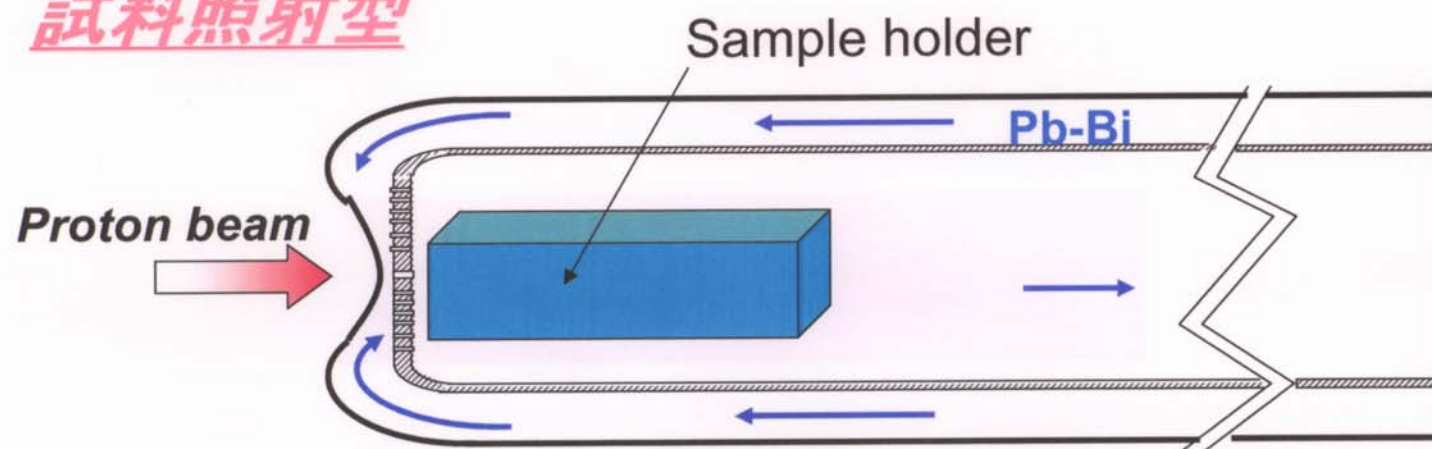
ターゲット概念

実機模擬型



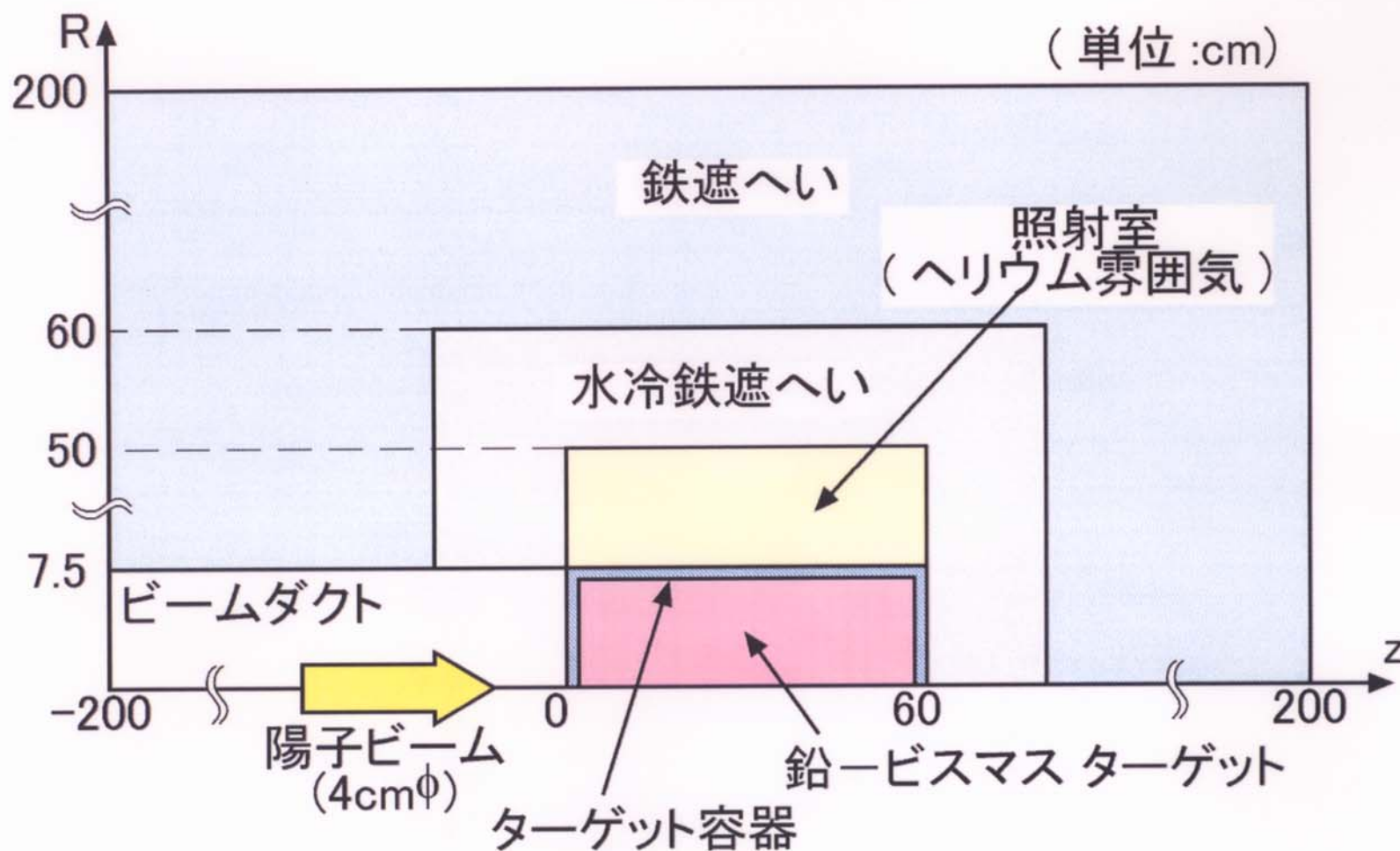
ADS実機のビーム窓を模擬し、成立性を検証

試料照射型

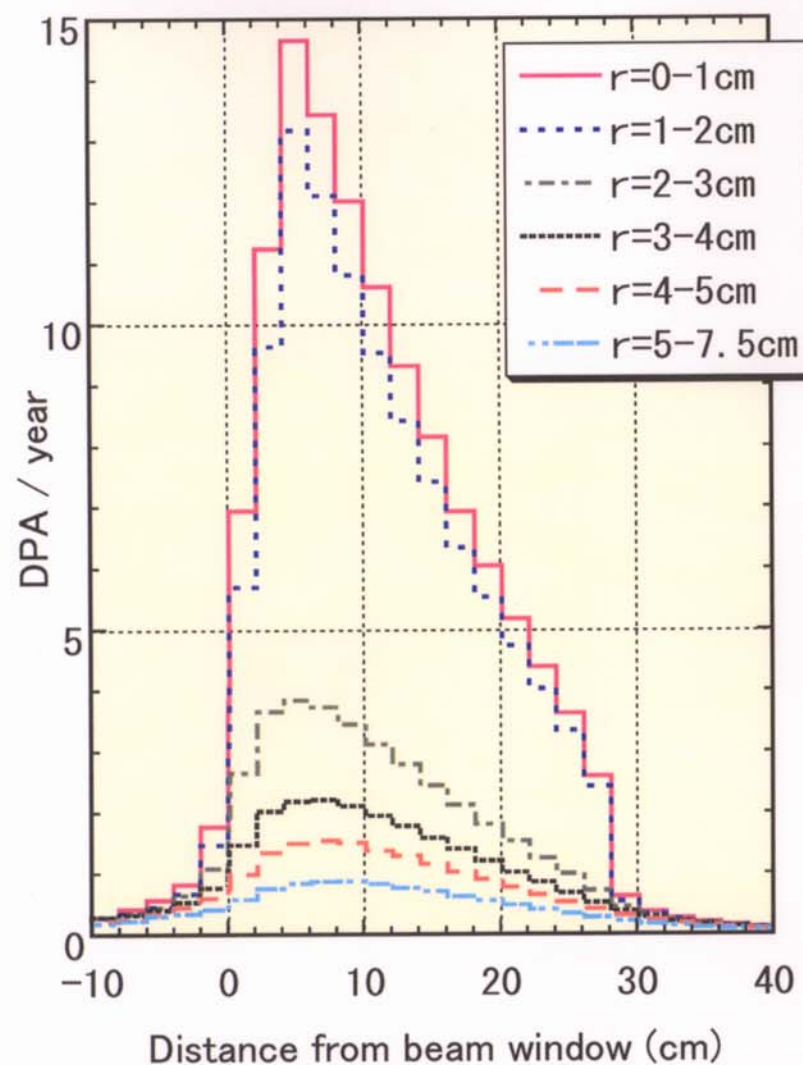


サンプルの照射を主目的

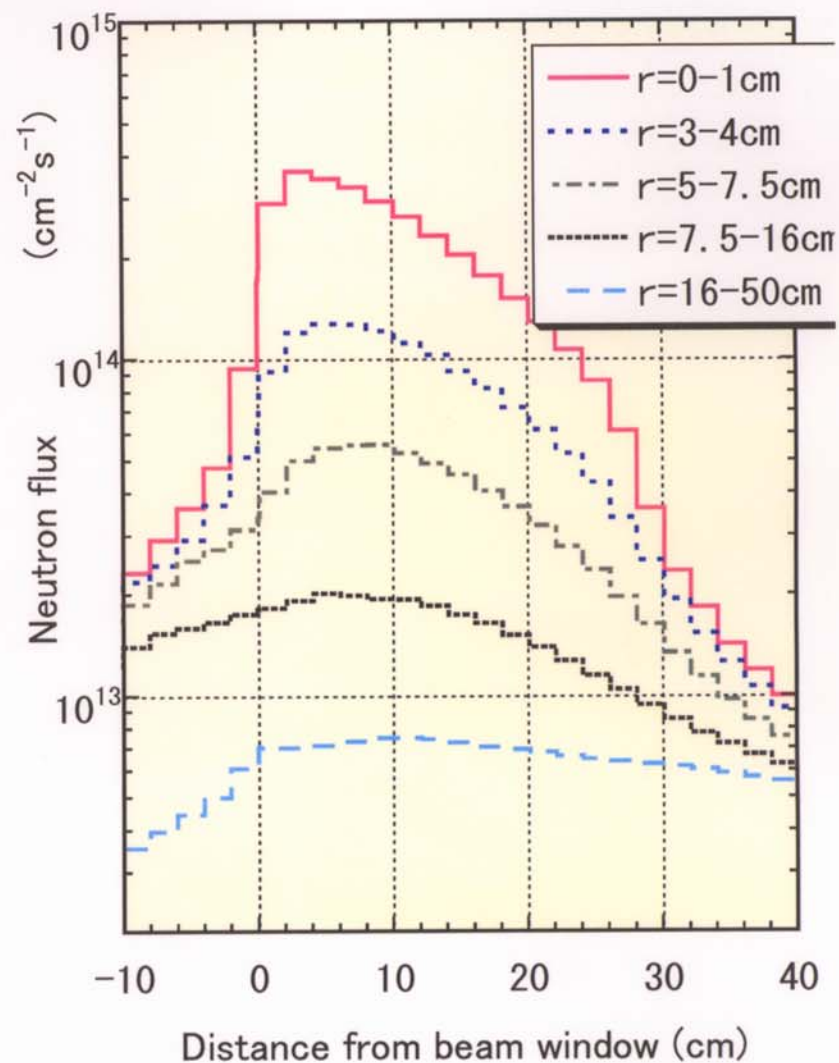
ADSターゲット試験施設 核計算モデル



照射場特性



鉛・ビスマスタターゲット中の年間DPA
(316SS)



中性子束の軸方向分布

ADSターゲット試験施設の材料照射場特性

陽子ビーム条件	600MeV-200kW
ビーム入射条件	$\phi 4\text{cm}$ ・一様分布
最大中性子束	$1.5 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2/\text{s}$
最大弾き出し損傷率	15 DPA/year
10 DPA/yの照射体積	$4\text{cm } \phi \times 15\text{cmL}$
冷却材流速	$\sim 2\text{m/s}$
照射場の温度範囲	$350 \sim 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ADSターゲット試験施設での研究開発課題

研究・開発の目的	研究・開発課題
陽子及び中性子による材料の照射損傷	ビーム窓の健全性及び寿命の評価
	陽子・中性子の複合照射効果
	高速中性子照射のデータベース構築
	静的応力下での照射効果
強放射線環境において流動する液体金属と材料の共存性	放射線による腐食の促進効果の検証
	共存性に対する液体金属の温度、流速、溶存酸素濃度依存性
	核破砕反応生成物の効果
液体金属核破砕ターゲットシステムの制御・運転特性	ポンプ、熱交換器、流量計、溶存酸素濃度計などのホット環境試験
	ビームトリップ及び再起動に伴うシステム過渡応答特性
	核破砕生成物及びポロニウムの純化・閉じ込め技術
	遠隔保守技術の開発