

# ADS用陽子加速器が満たすべき 信頼性についての考察

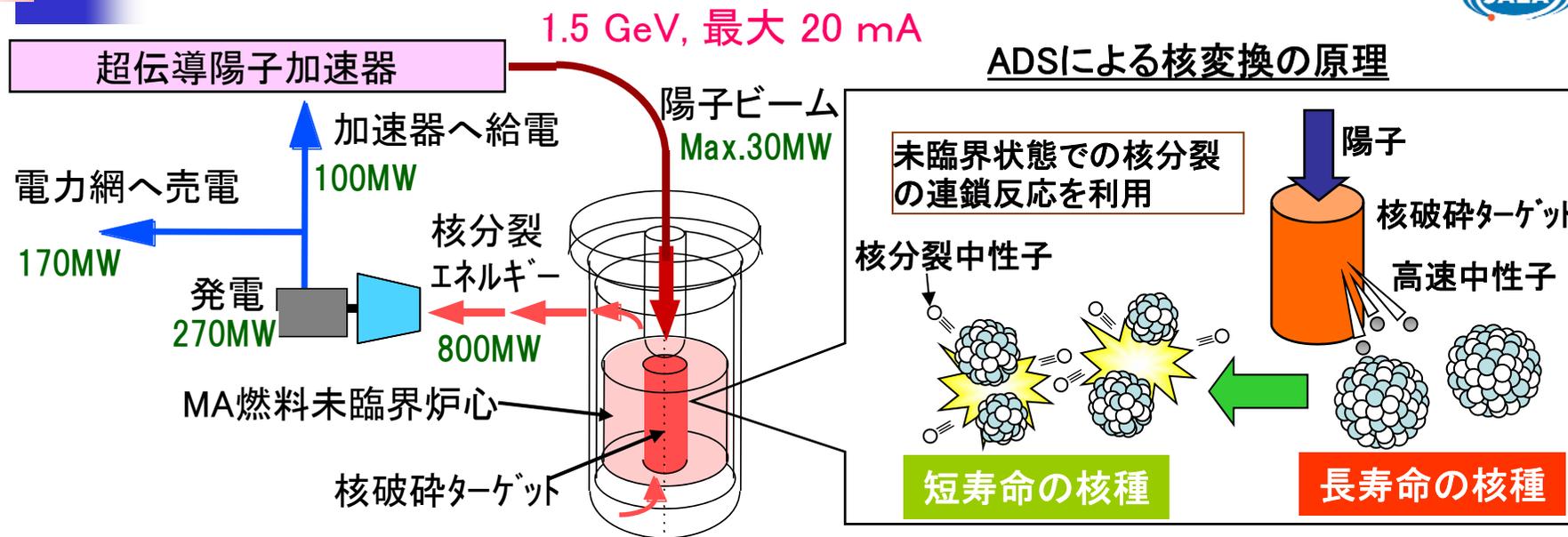
日本原子力研究開発機構

J-PARCセンター 武井 早憲

## 目次

1. 加速器駆動未臨界炉
2. 許容ビームトリップ頻度の算出
  - ・未臨界炉の各要素における熱応力解析
3. 運転実績から算出したADS用加速器のビームトリップ頻度
4. ADS用加速器における許容ビームトリップ頻度と運転実績との比較
5. まとめ

# 1. 加速器駆動未臨界炉: ADS (Accelerator Driven System)



## 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。
- ・陽子はビームダクト・ビーム窓を通過して鉛・ビスマス(Pb-Bi)に入射。
- ・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)。
- ・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。

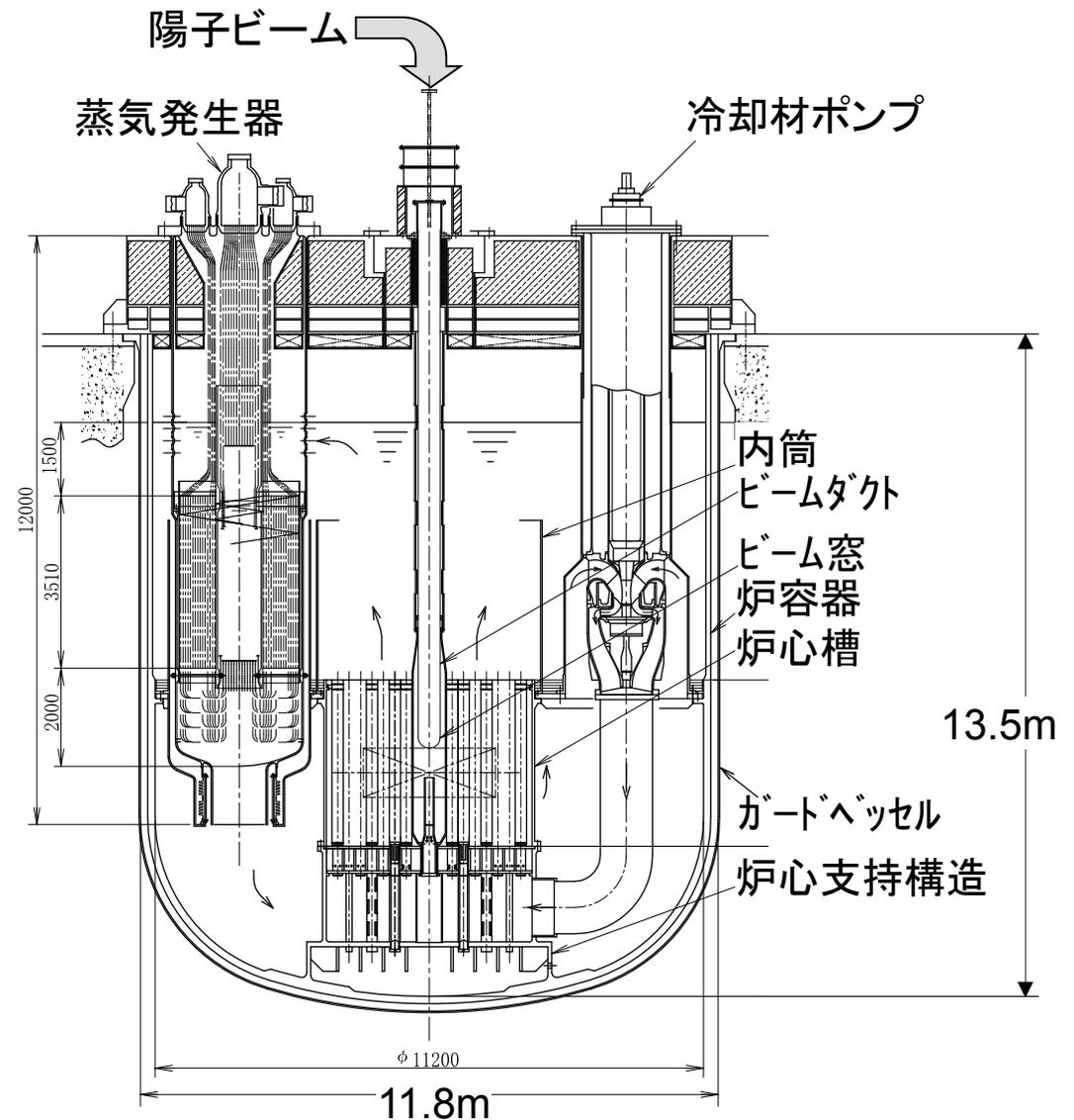
## ADSの特徴:

- ・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(遅発中性子割合、冷却材ボイド反応度等)が生じるが、ADSでは影響が小さいため使用可能。  
→ 1基で軽水炉10基分のMAを核変換。
- ・Pb-Biは化学的に不活性。

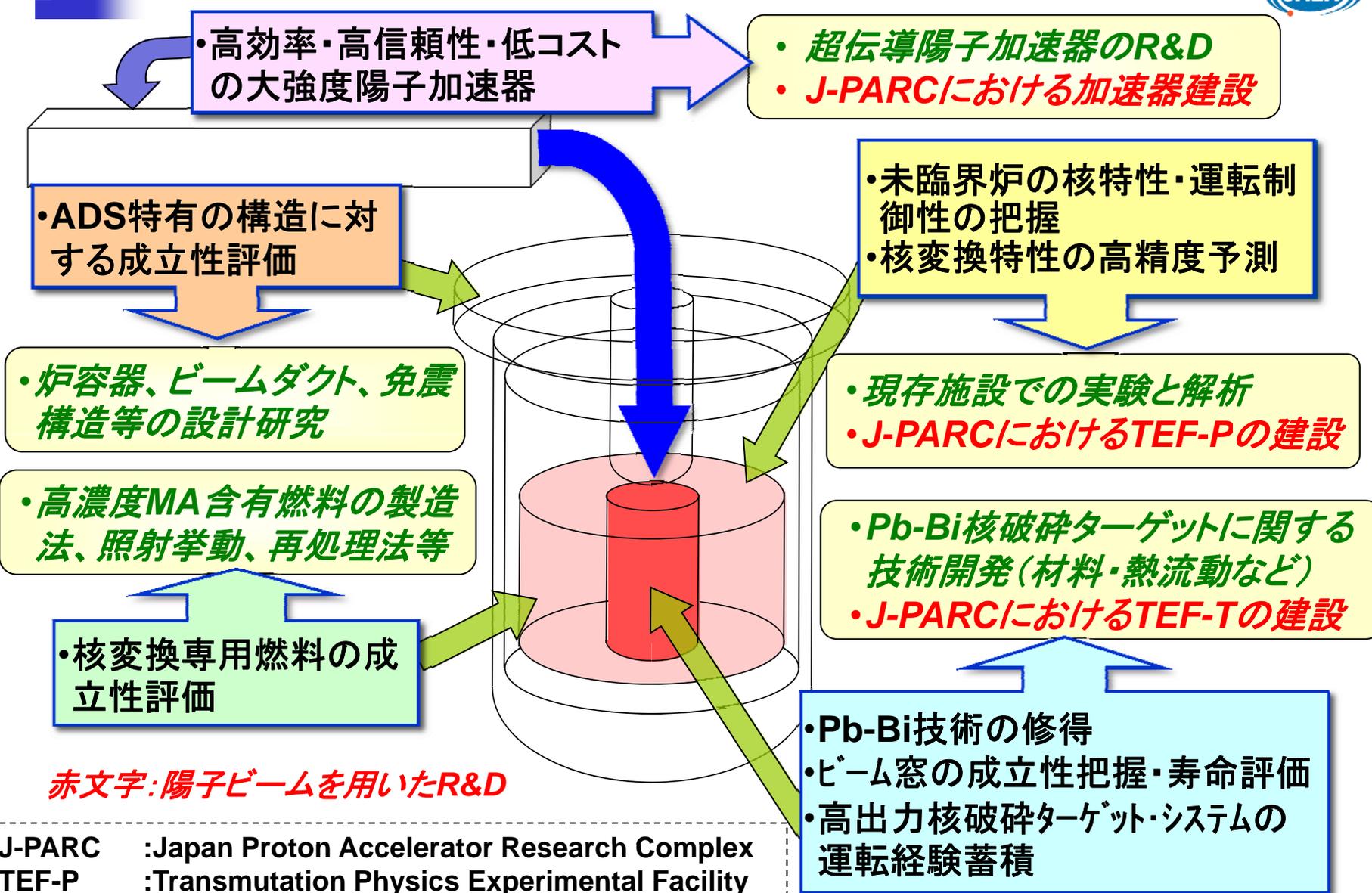
# ADSの概略仕様



- ・ 陽子ビーム : 1.5GeV
- ・ 核破砕ターゲット : Pb-Bi
- ・ 冷却材 : Pb-Bi  
    入り口 : 300°C、出口 : 407°C
- ・ 最大  $k_{\text{eff}} = 0.97$
- ・ 熱出力 : 800MWt
- ・ MA初期装荷量 : 2.5t
- ・ 燃料組成 :  
    (MA + Pu)N + ZrN
- ・ 核変換効率 :  
    10%MA / 年
- ・ 燃料交換法 : 600EFPD, 1 バッチ
  
- ・ 主循環ポンプ : 2基
- ・ 蒸気発生器 : 4基
- ・ 崩壊熱除去系 : 3系統



# ADSの開発に必要な技術



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

# 鉛ビスマスによるビーム窓模擬体の冷却試験



目的: ビーム窓成立性評価で重要な鉛ビスマスの伝熱流動特性を把握する



伝熱流動ループ全景 (JLBL-3)



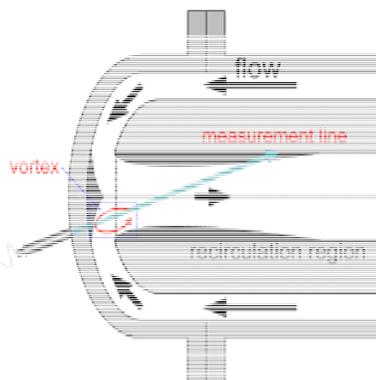
ヒータ出力: 6kW  
 流量: 100-500 L/min.  
 入り口温度: 330-430°C

ビーム窓模擬試験体



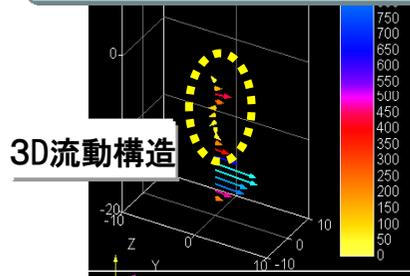
オーバーフロー部の流況

## LBE流動の実験的評価手法



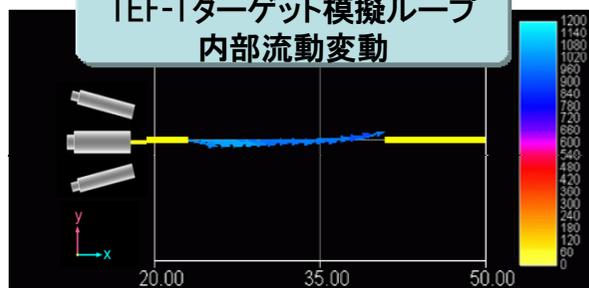
TEF-Tターゲット  
 模擬ループ (JLBL-2)

### エロージョン発生箇所を模擬した 局所流動計測



3D流動構造

### TEF-Tターゲット模擬ループ 内部流動変動



- 先端部で温度の不安定挙動が観察されたが、全体的な熱伝達特性は、乱流モデルに低Re数型線形  $k-\epsilon$  モデルで精度良く予測可能
- 今後、グリッドスペーサを含めた被覆管の伝熱流動試験が必要
- 予測解析手法の実験的評価のため、超音波によるLBE流動計測手法を開発中(耐熱性に課題)

# 1. ADSで解決すべき点 — ビームトリップ時の熱負荷 —



- 加速器の信頼性を向上させる**目標値**について、統一した見解はない
- **未臨界炉側**から**許容**されるビームトリップ頻度は、十分に評価されていない

**➡ 加速器の信頼性について、厳しい条件を要求する**

- ヨーロッパで検討されている商用ADSにおける停止時間(年間)の評価

停止原因	商用ADS (EFIT)
メンテナンス	91 日間
ビームトリップ	<b>14.6日間</b>
合計	105.8 日間
年間稼働率	<b>71 %</b>

## 計算条件

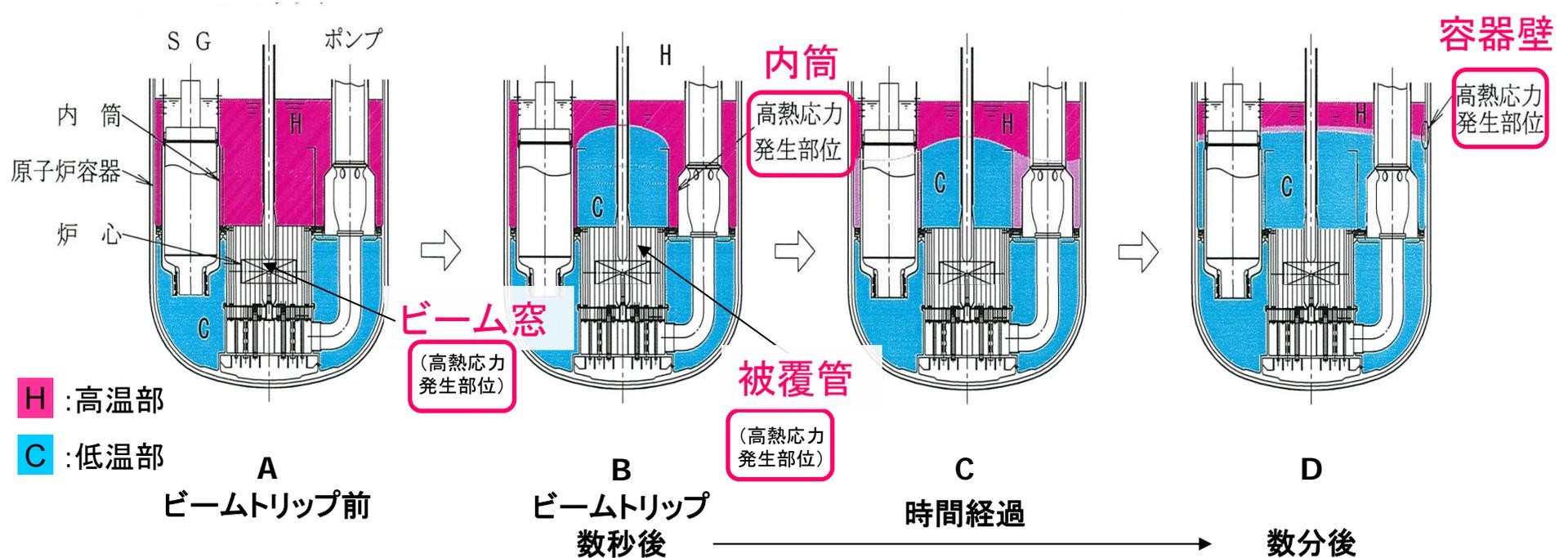
- ビームトリップ回数: **7回/年**  
(トリップ時間1秒以上)
- **トリップ後、プラントは稼働停止**
- **プラント起動時間: 50 時間**

# 1. ADSで解決すべき点 – ビームトリップ時の熱負荷 –



## 研究の目的

ビームトリップ時に未臨界炉の各要素が受ける熱負荷を評価し、許容ビームトリップ頻度を明確にする。



■ 評価対象部位はADS特有のビーム窓部、燃料被覆管、内筒、原子炉容器壁とする

## 2. 未臨界炉の各要素における熱応力解析（燃料被覆管）



### ① 解析条件の調査

- ・燃料からのFPガス放出率を100 %と仮定する。
- ・燃料被覆管外面における鉛・ビスマスによる腐食を考慮する。
- ・ビームトリップ時に、ミーゼス相当歪み範囲が最も大きくなる条件を設定する。

### ② 有限要素法 構造解析プログラム ABAQUS による熱伝導、熱応力解析の実施

- ・一様に軸方向に流れる流体中での熱伝導解析を実施し、温度分布を求める。
- ・温度分布より熱応力解析を実施し、燃料被覆管の熱応力分布、歪み量を求める。

### ③ 解析結果の評価

※ 実用化戦略調査研究 フェーズII 鉛ビスマス炉を参考とする

- ・累積クリープ損傷係数(CDF)
- ・周方向応力

## 2. 熱応力解析における諸条件（燃料被覆管）



### ■ 物性値など

- 燃料：
  - ・窒化物,
  - ・外径  $\phi 6.48$  mm,
  - ・スミア密度 95 %,
  - ・被覆管とのギャップサイズ 84  $\mu\text{m}$
  - ・ギャップ熱伝達He-ボンド
  - ・生成He量 0.0091 mol/pin
  - ・FP生成率 27 %
  - ・FP放出率 100 %

### ■ 燃料被覆管：

- ・外径  $\phi 7.65$  mm,
- ・肉厚 0.5 mm,
- ・改良 9Cr-1Mo 鋼（未照射材の物性値）,
- ・腐食量 表面 125 $\mu\text{m}$   
(530 $^{\circ}\text{C}$ , 2年間の腐食量の1.5倍)
- 内面 0  $\mu\text{m}$
- ・ガスプレナムの長さ 1.15 m（上部のみ）

### ■ 冷却材：

- ・流速 2 m/s（乱流）,
- ・入口温度 300  $^{\circ}\text{C}$ ,

### ■ 熱応力を解析した条件

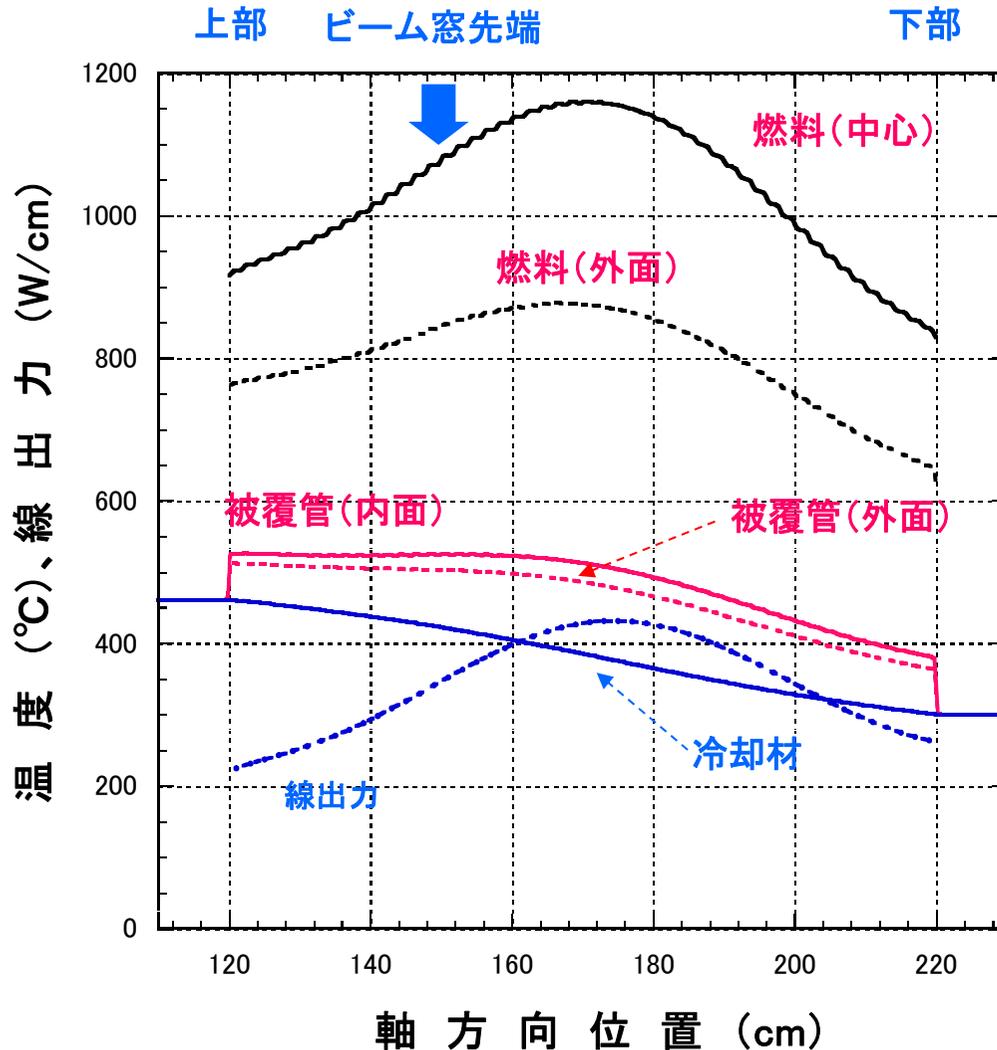
ビームトリップ時に、ミーゼス相当歪み範囲が最も大きくなる条件を設定する。

- ・被覆管表面温度が最も高くなる第2サイクル末期（1200日目）を選定する。  
 $k_{\text{eff}}=0.9582$ , ビーム電流=15.8 mA
- ・ビーム軸に最も近い燃料ピンを選定する。（ $R=27.88$  cm, 線出力 34.3 kW/m）
- ・第二サイクル末期における腐食量、内圧を仮定し、この状態が1サイクル（600日）続いたと仮定する。

## 2. 定常状態における健全性評価（燃料被覆管）



### ■ 最内側ピンの温度分布



### ■ 燃料被覆管において

- 肉厚中心部における最高温度：519 °C
- ガス内圧：7.4 MPa
- ミーゼス等価応力の最大値：90 MPa

項目	制限目安	評価値
累積クリープ 損傷係数 (CDF)	< 0.02 <sup>a)</sup>	$5.3 \times 10^{-5}$
周方向 応力	< 123 MPa <sup>b)</sup>	103 MPa

a) 9Cr-1Mo-V

b) 改良9Cr-1Mo, Smベース (525°C)



定常状態で成立する可能性が高い

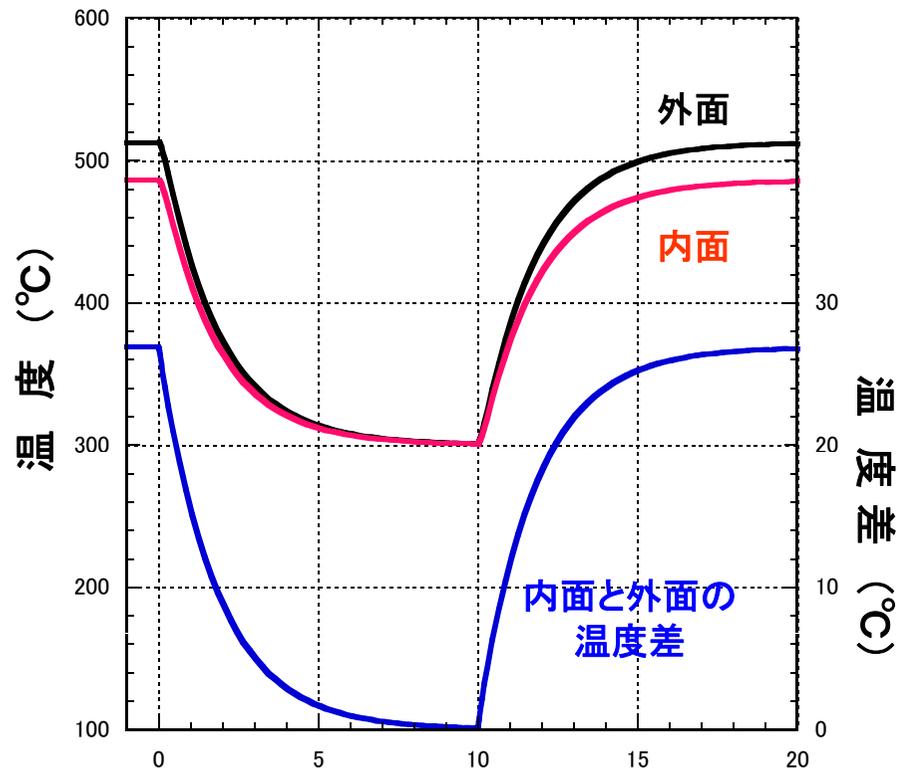
## 2. ビームトリップ時における評価結果（燃料被覆管）



### ■ 燃料被覆管における温度変化

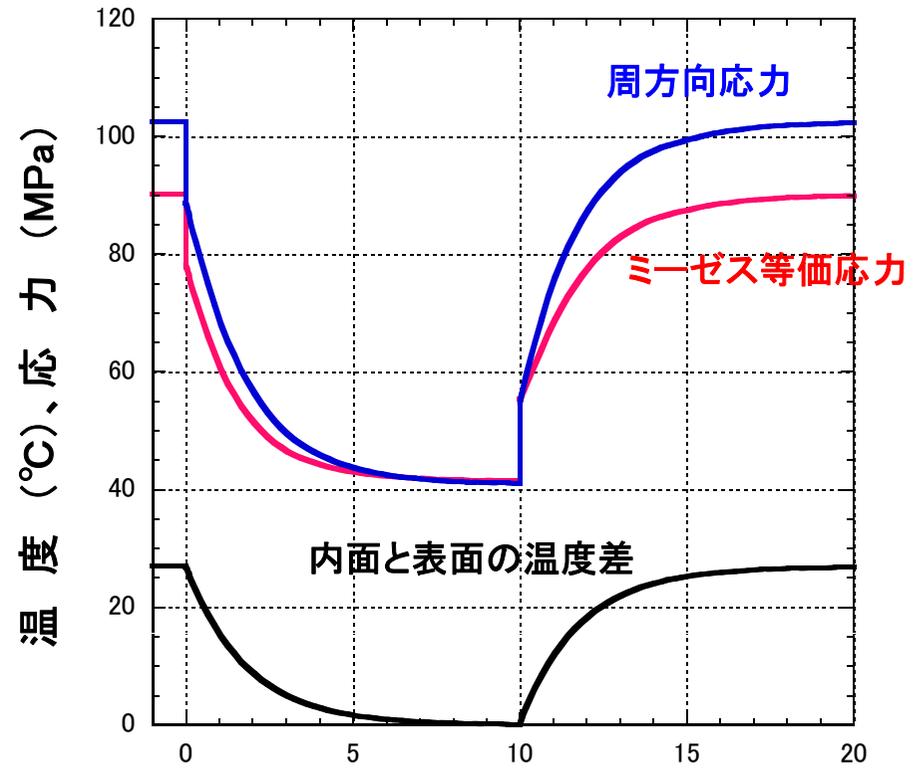
（歪み範囲が大きくなるように、ビーム停止時間を10秒と仮定する。）

相当歪みが最大の場所 (z=170.4の表面)



ビーム停止からの経過時間 (秒)

相当歪みが最大の場所 (z=170.4の表面)



ビーム停止からの経過時間 (秒)

## 2. ビームトリップ時における評価結果（燃料被覆管）



### ■ 最大ミーゼス相当歪み

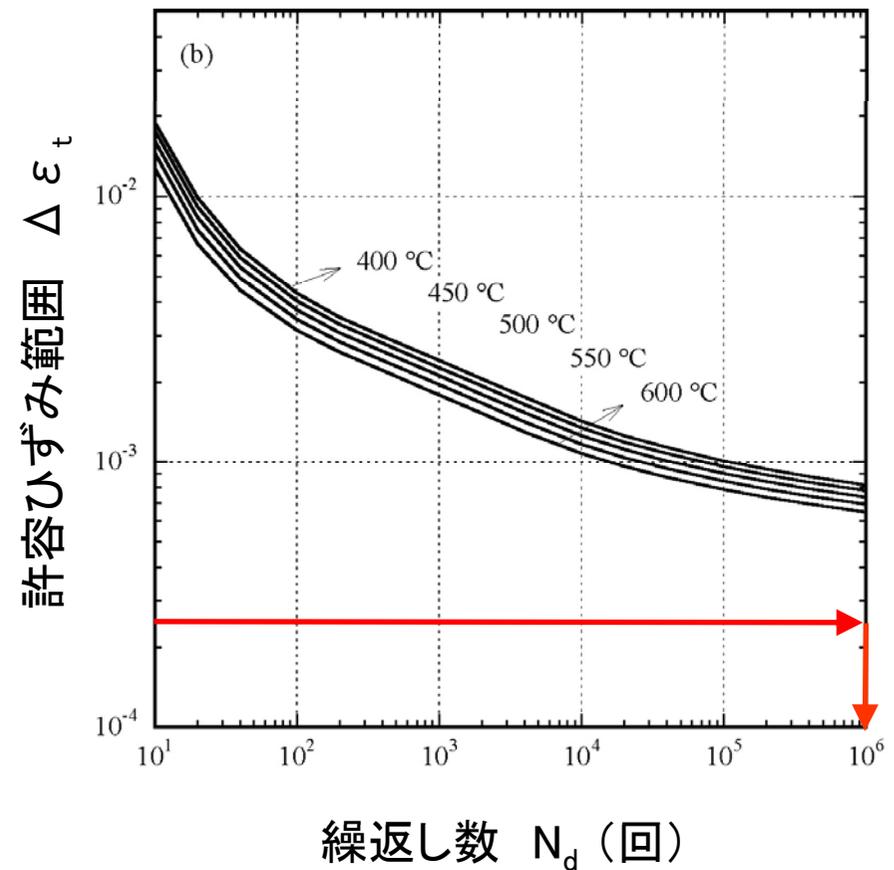
ビーム入射時:  $4.3 \times 10^{-4}$

ビーム停止時:  $1.9 \times 10^{-4}$



- ビームトリップによるミーゼス相当歪み範囲として  $2.5 \times 10^{-4}$  を仮定
- 許容繰返し数:  $>10^6$  回
- 燃料被覆管の交換頻度: 2 年
- 許容ビームトリップ頻度: 年  $5 \times 10^5$  回以上 (ビーム停止時間: 5 秒以上)

### ■ 改良9Cr-1Mo鋼における許容ひずみ範囲



## 2. 未臨界炉側から求めた許容ビームトリップ頻度



### ■ ビーム窓部、燃料被覆管、内筒、原子炉容器壁から求めた許容ビームトリップ回数

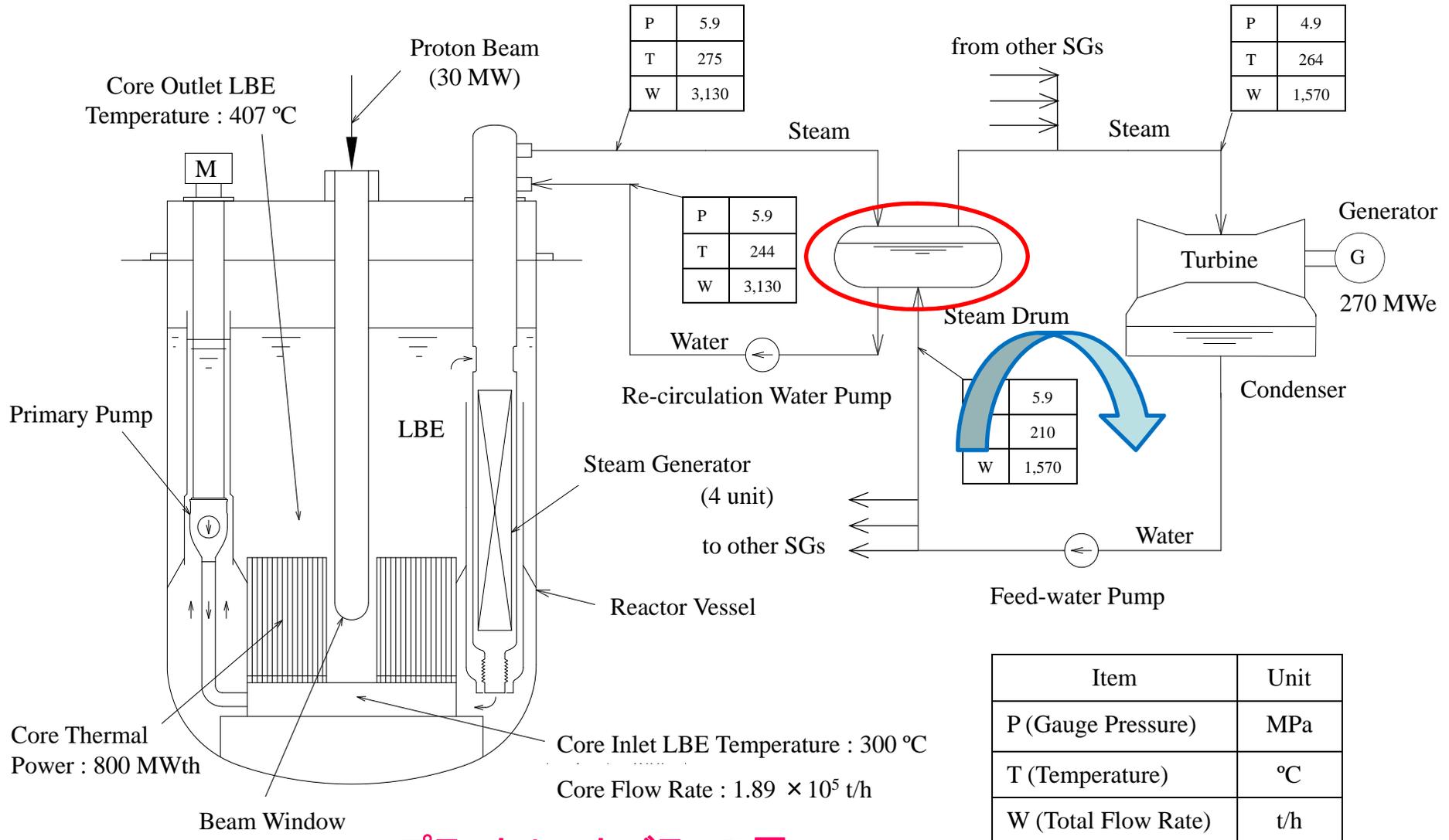
ビームトリップ時間	許容ビームトリップ回数	備考
$0 < T < 10 \text{ sec.}$ <i>(Short case)</i>	$4 \cdot 10^4 / 2 \text{ years}$ $> 10^6 / 2 \text{ years}$ $10^6 / 40 \text{ years}$ <b>(20,000 / y)</b>	ビーム窓からの制限 燃料被覆管からの制限 内筒からの制限
$10 \text{ sec.} < T < 5 \text{ min.}$ <i>(Medium case)</i>	$8 \cdot 10^4 / 40 \text{ years}$ $10^6 / 40 \text{ years}$ <b>(2,000 / y)</b>	内筒からの制限 原子炉容器からの制限
$T > 5 \text{ min.}$ <i>(Long case)</i>		年間稼働率からの制限

## 2. 未臨界炉側から求めた許容ビームトリップ頻度



### ■ 飽和蒸気ドラムを用いた冷却系の採用

ビームトリップ時でも発電が可能



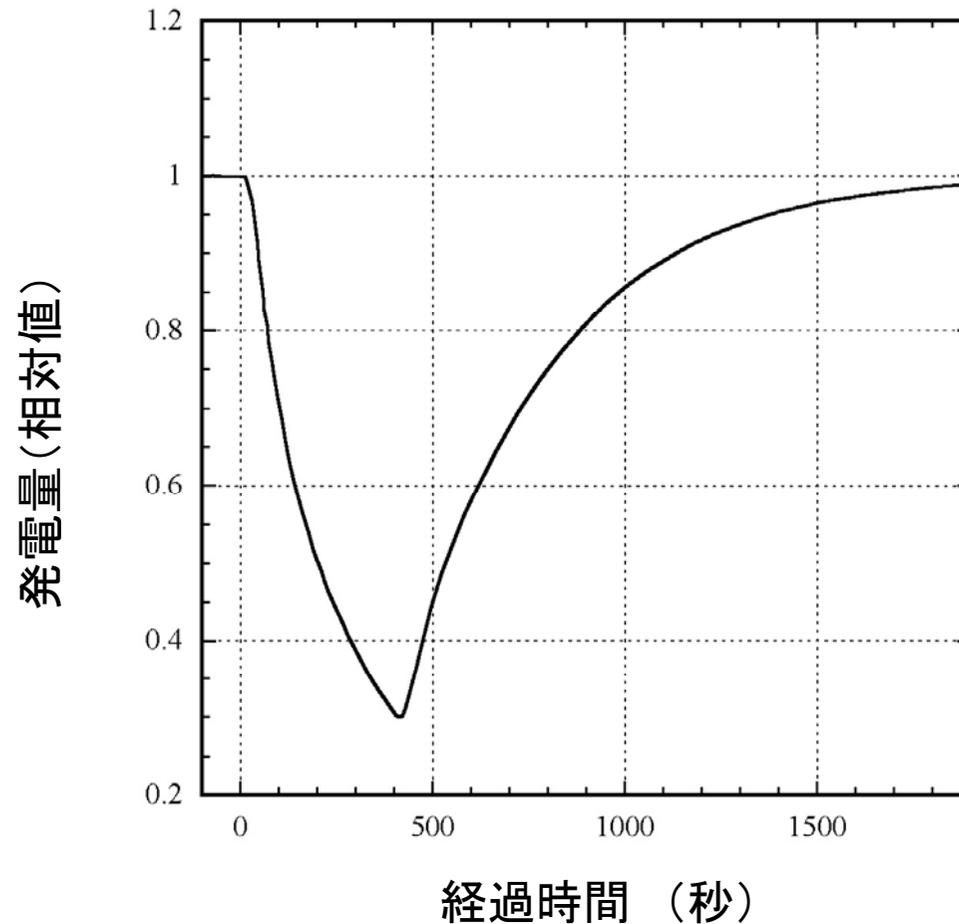
プラントヒートバランス図

## 2. 未臨界炉側から求めた許容ビームトリップ頻度



### ■ 飽和蒸気ドラムを用いた冷却系の採用

### トリップ時間400秒のビームトリップにおける発電量の変化



定格値の30%でプラントが稼働できる

### 年間稼働率についての仮定

- トリップ時間が5分間以上のビームトリップに対してプラントが停止
- プラント起動時間: 20.1 時間  
(加速器停止9時間、起動～定格まで11.1時間)

## 2. 未臨界炉側から求めた許容ビームトリップ頻度



### ■ ビーム窓部、燃料被覆管、内筒、原子炉容器壁から求めた許容ビームトリップ回数

ビームトリップ時間	許容ビームトリップ回数	備考
$0 < T < 10 \text{ sec.}$ <i>(Short case)</i>	$4 \cdot 10^4 / 2 \text{ years}$ $> 10^6 / 2 \text{ years}$ $10^6 / 40 \text{ years}$ <b>(20,000 / y)</b>	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
$10 \text{ sec.} < T < 5 \text{ min.}$ <i>(Medium case)</i>	$8 \cdot 10^4 / 40 \text{ years}$ $10^6 / 40 \text{ years}$ <b>(2,000 / y)</b>	内筒からの制限 原子炉容器からの制限
$T > 5 \text{ min.}$ <i>(Long case)</i>	<b>42 / y</b>	年間稼働率(70%)からの制限

## 2. 未臨界炉側から求めた許容ビームトリップ頻度



### ■ EFITとの比較

停止原因	JAEA	商用ADS (EFIT)
メンテナンス	65日間	91日間
ビームトリップ		
5分以内	9.3日間	14.6日間
5分超	35.3日間	
合計	109.6日間	105.8日間
年間稼働率	70%	71%

### 3. 運転実績から算出したADS用加速器のビームトリップ頻度



#### ■ 加速器の運転実績から評価したビーム停止頻度

- ・「イオン源＋高周波系」の停止が**全体の85%\***を占める。(\* LANSCE)
- ・このため、「イオン源＋高周波系」の運転実績から**推定**する。

イオン源		調査年	年間運転時間 (計画値)	停止頻度 (回/時間)	備考
LANSCE	陽子	1997	2,870	1.3	リニアック、800MeV、1.25mA H <sup>+</sup>
SILHI	陽子	1999	104	0.01	高周波イオン源、75mA

高周波系		調査年	年間運転時間 (計画値)	停止頻度 (回/時間/本)	クライストロン数
LANSCE	陽子	1997	2,870	0.001	44 本
KEKB	電子	2005	6,815	0.03	60 本
ADS	陽子		7,200		89 本

#### ■ 高周波系としてKEKBの運転実績を採用

- ・クライストロン本数と運転時間がADSの仕様値に近い
- ・トリップ事象や打切り事象などの詳細なデータ解析が可能  
(カプラン・マイヤー推定法)

### 3. 運転実績から算出したADS用加速器のビームトリップ頻度



機器名	施設名	平均トリップ間隔	平均トリップ時間
イオン源	LANSCE	0.77 時間	0.034 時間
高周波系	KEKB入射器	55.6 時間	0.071 時間

#### ADS用加速器の年間トリップ回数

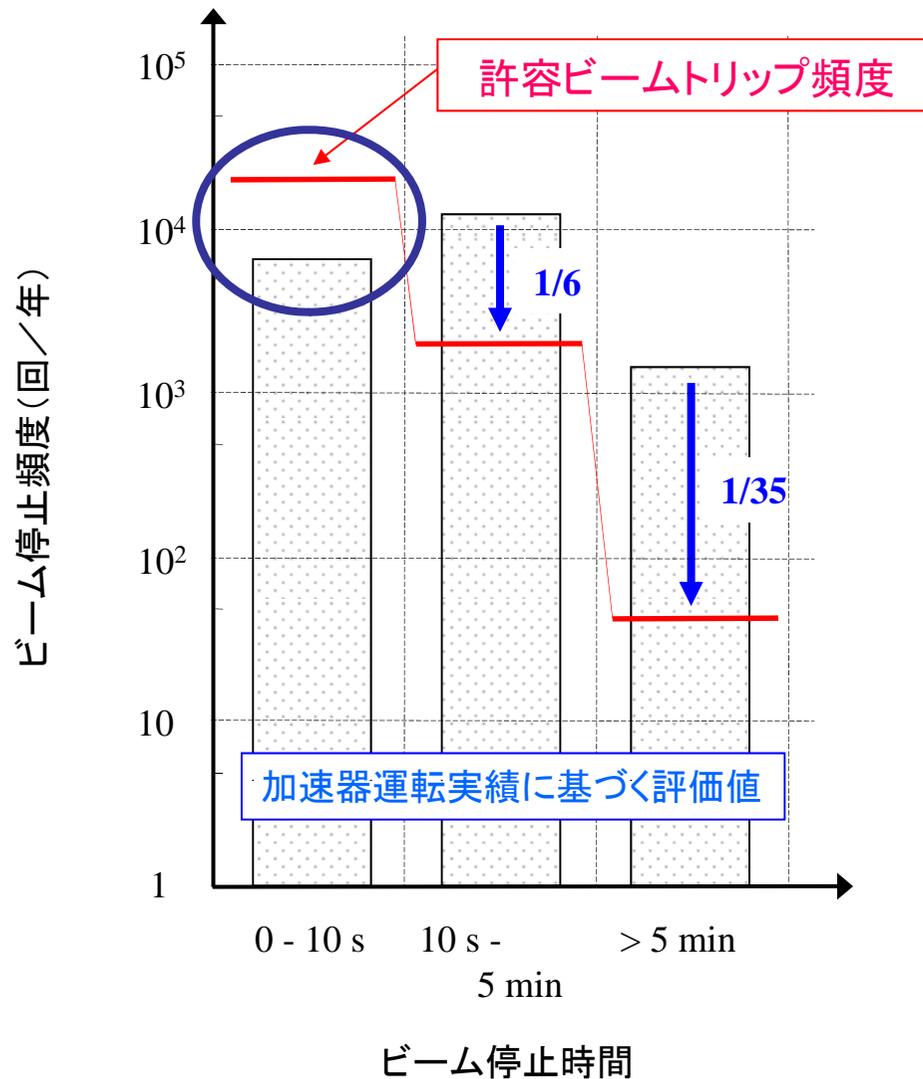
- ・イオン源: 9,000回
- ・高周波源: 12,000回

## 4. ADS用加速器における許容ビームトリップ頻度と

運転実績との比較



停止時間毎のビームトリップ頻度



停止時間が10秒以下の事象

➡ 許容ビームトリップ頻度を満たす

停止時間が10秒以上の事象

➡ 許容ビームトリップ頻度を満たすためには、現状の頻度を6分の1、35分の1まで低減させる必要がある

### □ADS用陽子加速器が満たすべき信頼性についての考察 [1]

- ビームトリップ時に未臨界炉の各要素が受ける熱負荷を評価した結果、許容ビームトリップ頻度が明確になった。
- トリップ時間が10秒以下のトリップ事象については、現状の加速器技術でもビームトリップ頻度は許容値を満足する。
- トリップ時間が10秒以上のトリップ事象については、許容ビームトリップ頻度を満たすためには、現状の頻度を6分の1、35分の1まで低減させる必要がある。

[1] H. Takei, et al., "Estimation of Acceptable Beam-Trip Frequencies of Accelerators for Accelerator-Driven Systems and Comparison with Existing Performance Data", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 49, pp.384-397, (2012).

# 大強度陽子加速器プロジェクト J-PARC



Jan. 28, 2008



# 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: TEF-P

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: 400MeV-10W

熱出力: 500W以下

## ADSターゲット試験施設: TEF-T

目的: 大強度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: 400MeV-250kW

ターゲット材料: 鉛ビスマス合金

