

分置

R & D 報告会資料

〔平成16年度 第5回～第7回〕

(業務報告)

2005年4月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2005

R & D 報告会資料

[平成 16 年度 第 5 回～第 7 回]

(業務報告)

大洗工学センター 開発調整室*

要 旨

大洗工学センターの R & D 報告会は、同センターにおける研究開発の成果を報告し、所内又はサイクル機構における他の部門の研究者等との議論を深め、もって研究開発の質的向上と効率的な推進に資することを目的としている。

本資料は、平成 16 年 10 月から平成 17 年 2 月にかけて開催された R & D 報告会の資料を取りまとめたものである。R & D 報告会の詳細な報告については、各課室グループから成果報告書として発行される予定である。

*編集事務局

目 次

[第5回 R&D報告会] 平成16年10月22日開催

1. L E Sにおける壁近傍乱流モデルの開発 1
技開部 流体 Gr 高田 孝
2. 高速炉構造設計に用いる 12C r 鋼材料物性値の検討 11
技開部 材料研 Gr 研究員 安藤 勝訓
3. N a 中高サイクル熱疲労試験 (S P E C T R A) の現状 23
技開部 開発 Gr 副主研 長谷部慎一

[第6回 R&D報告会] 平成17年1月28日開催

1. 次世代個人線量計の選定 33
安管部 放管課 副主研 橋本 周
2. Ge ダストモニタの性能評価 59
安管部 安対課 研究員 細谷 梨沙
3. 事故時の希ガス放出量評価 73
安管部 放管課 技術員 薄井 利英

[第7回 R&D報告会] 平成17年2月18日開催

1. 燃料製造システムにおける MA 含有燃料の発熱影響検討 89
システム部 燃料製造 Gr 小池 和宏
2. MA 燃焼・核変換量に関する MA 燃焼方式の比較検討 97
システム部 炉燃 Gr 副主研 杉野 和輝
3. MA 装荷炉心の炉心特性に関する検討 109
システム部 中性子 Gr 副主研 大木 繁夫

第 5 回 R & D 報告会

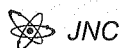
[平成 16 年 10 月 22 日]

平成16年度 第5回研究開発報告会

海外出張報告：LESにおける壁近傍乱流モデルの開発

出張先 : CEAグルノーブル研究所
出張期間 : 2003/6/23～2004/6/30

要素技術開発部 流体計算工学研究Gr.
高田 孝



平成16年度 第5回研究開発報告会 2004.10.22

発表内容

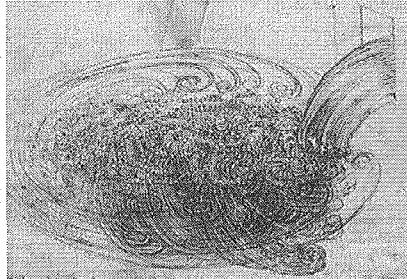
1. 研究背景
2. 研究目的
3. 壁近傍乱流モデルの開発
4. 平行平板間流れへの適応
5. まとめ



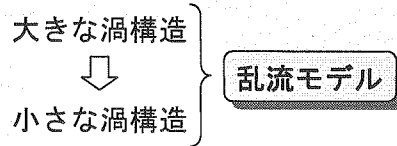
平成16年度 第5回研究開発報告会 2004.10.22

1. 研究背景

○ 乱流とは



レオナルド・ダ・ヴィンチのスケッチ



- ✓ エネルギーが散逸的
- ✓ 変動成分を伴う

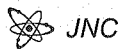
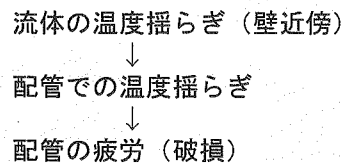
身近な乱流現象：飛行機の揺れ, 煙
ゴルフボール

➤ 乱流現象の工学問題（温度揺らぎに伴う配管信頼性）

サーマルストライピング



配管合流部下流での渦の様子（渦度）



1. 研究背景

○ JNC,CEAでの乱流モデル開発状況



モデル コード	渦粘性モデル	応力方程式 モデル	LES	直接計算 (DNS)
[JNC] AQUA	k-ε	ASM	(MILES)	差分DNS
CASCADE	k-ε	RSM		
DINUS-3				
[CEA] Trio_U	k-ε		LES	

次世代において主流となりうるLESモデル技術, ノウハウの習得



2. 研究目的

- 日仏先進協力協定の熱流動分野(NWP-5b)での合意内容
(乱流伝熱流動研究に関する合意)

- ▶ 壁近傍乱流モデルの共同研究 (開発)

Large Eddy Simulation (LES)

- ▶ 実験データ, 解析コードの共有 (検証)

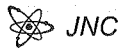
JNC	: WATLON実験	} 温度揺らぎに伴う配管信頼性 に関する実験
CEA	: HYPI実験	
	Trio_Uコード(LES)	

- ▶ 研究者の相互派遣

- JNC独自の目的

- ▶ LES技術, ノウハウの習得

3ヶ年計画, 2003~2005年



3. 壁近傍乱流モデルの開発

- 壁近傍モデルの必要性

工学的問題 (大規模、高Re数) ⇨ 壁近傍で詳細なメッシュが必要
(Re数 ≒ 100万 → 99%以上)



壁近傍モデルの導入による計算負荷の低減



既存壁近傍モデル: 壁関数モデル



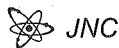
高度な解析: 壁近傍情報の必要性 (流体-構造連成問題)



計算負荷が少なく、かつ壁近傍情報が得られるモデル構築

- 新規壁近傍モデル

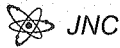
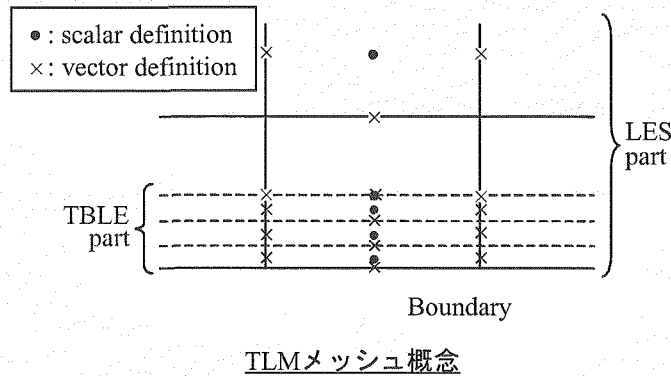
TLM (Two-Layer Model) (Baralás, 1996)



3. 壁近傍乱流モデルの開発

○ TLMアプローチ

壁近傍にメッシュを新たに構築し、それぞれを個々に計算する



3. 壁近傍乱流モデルの開発

○ 基礎方程式(TBLE, Thin Boundary Layer Equation)

[質量保存]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \bar{\mathbf{u}} = 0$$

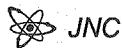
[運動量保存]

$$\rho \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}} = -\nabla p + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[(\mu + \rho \nu_t) \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial x_k} \right] + (\rho - \rho_0) \mathbf{g}$$

[エネルギー保存]

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \rho h \bar{\mathbf{u}} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\lambda + \frac{\rho C_p \nu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_k} \right] + Q \quad \left. \vphantom{\frac{\partial T}{\partial t}} \right\} \text{エネルギーへの拡張}$$

- 圧力項をソース項として計算負荷を低減
- 拡散項は壁に対し垂直方向のみ考慮



3. 壁近傍乱流モデルの開発

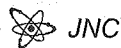
○ TLMアプローチの組込

➤ JNC-LES(サイクル機構開発)

- 解析手法 : 構造格子を用いた差分法
- 計算スキーム : 2次中心差分(移流, 拡散項)
2次Adams-Bashforth法(時間発展項)
- 数値解法 : Simplified Marker And Cell (SMAC)
- 圧力方程式解法 : ICCG (MICCG) or ILUCGS (MILUCGS)

➤ TLM (TBLE)

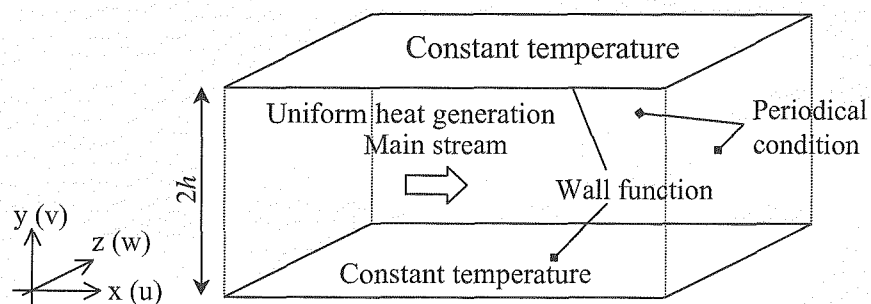
- 解析手法 : 構造格子を用いた差分法
- 計算スキーム : 2次中心差分(移流, 拡散項)
2次3点陰解法(時間発展項)



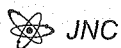
平成16年度 第5回研究開発報告会 2004.10.22

4. 平行平板間流れへの適応

○ 平行平板間流れ



解析体系



平成16年度 第5回研究開発報告会 2004.10.22

4. 平行平板間流れへの適応

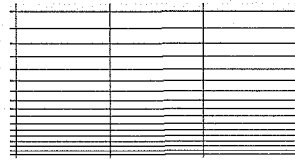
○ 解析条件

• 流動条件

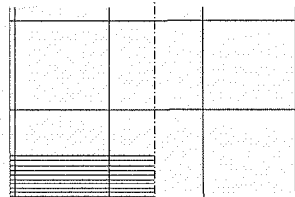
Re : 395 (摩擦Re数)
 Pr : 0.71 → 平均Re数 ≒ 10,000
 Pr_t : 0.85

• メッシュ条件

Geometry : 2 1 [m]
 (stream-, normal-, span-wise)
 Mesh : 48 N 48 (uniform)
 RLES N = 64
 stretching factor 1.099
 Log-Law N = 16 (uniform)
 TBLE N = 16 + 10 meshes 2
 stretching factor 1.035

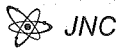


RLES(48 64 48)



TBLE Log-Law
 (48 16(+20) 48)

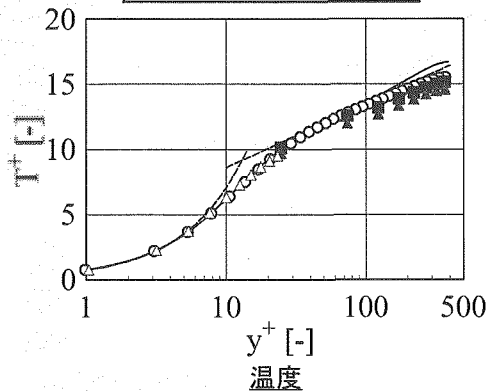
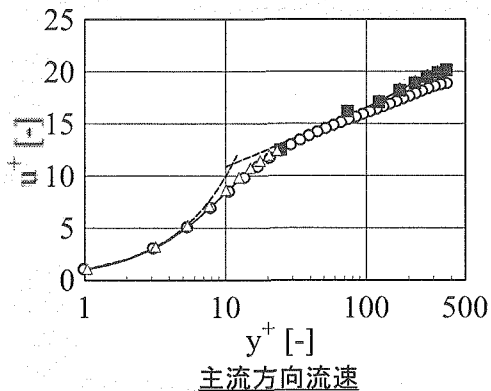
メッシュ (壁近傍)



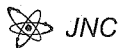
4. 平行平板間流れへの適応

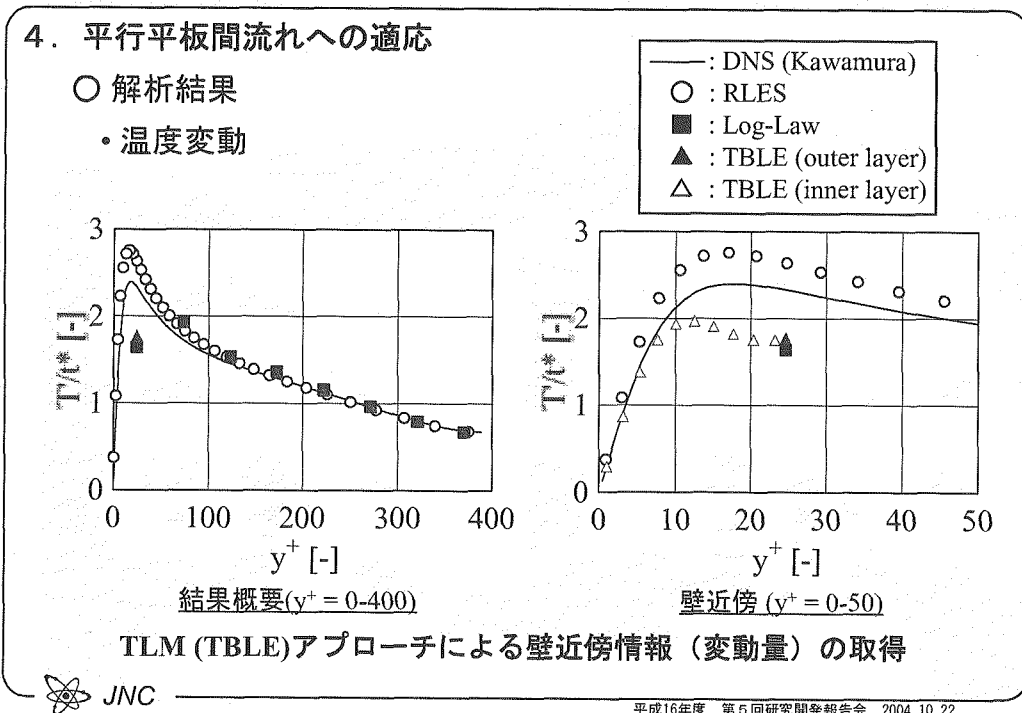
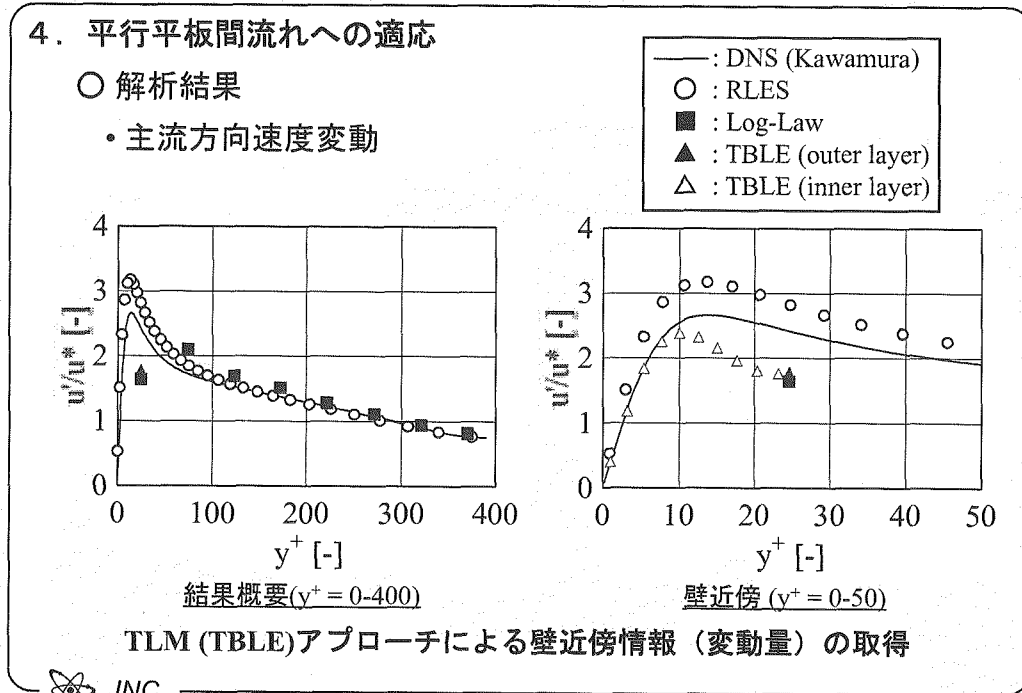
○ 解析結果

• 平均量



TLM (TBLE)アプローチによる壁近傍情報 (平均量) の取得

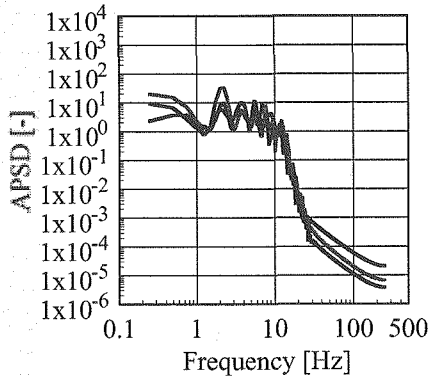
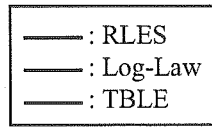




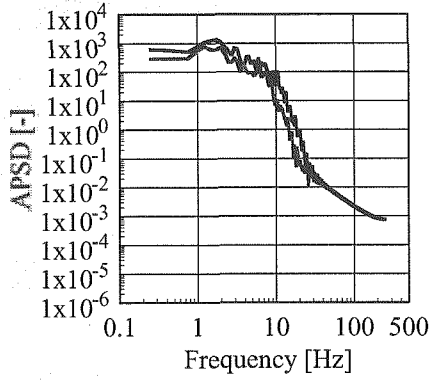
4. 平行平板間流れへの適応

○ 解析結果

・パワースペクトル(周波数分析)

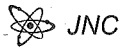


中心付近



壁近傍 ($y^+ = 5.4$)

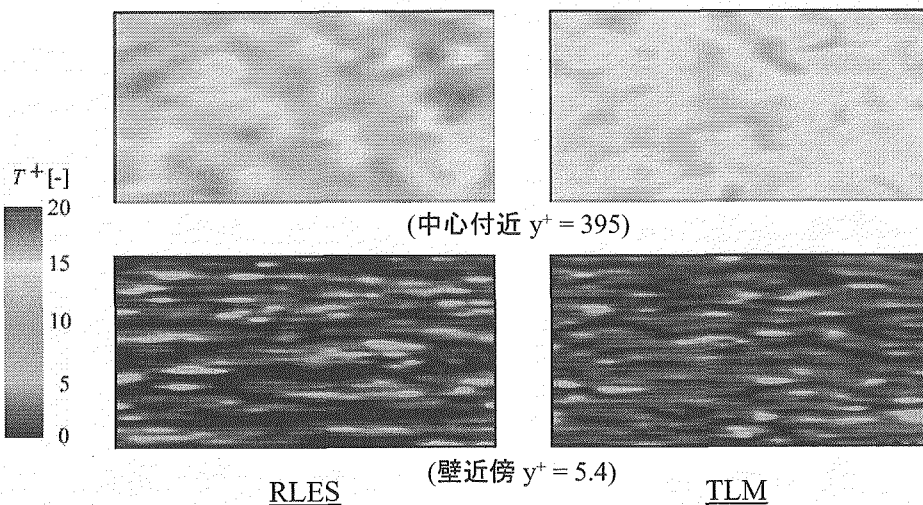
TLM (TBLE)アプローチによる壁近傍情報 (周波数特性) の取得



4. 平行平板間流れへの適応

○ 解析結果

・温度分布(瞬時)

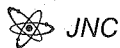


(中心付近 $y^+ = 395$)

(壁近傍 $y^+ = 5.4$)

RLES

TLM



4. 平行平板間流れへの適応

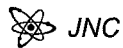
○ 解析結果

- ・ 計算負荷

RLES (48×64×48)	TLM (48×36×48)	Log-Law (48×16×48)
147,500	82,900	36,900
3.84	1.21	1.00

Normalized by Log-Law result

TLM (TBLE)アプローチは計算負荷低



5. まとめ

日仏先進協力協定の熱流動分野(NWP-5b)での合意

- ▶ 壁近傍乱流モデルの共同研究 (開発)



エネルギー方程式を含めたTLMモデルを開発

○ 平行平板間流れ

- ・ 従来モデル (壁関数) と異なり壁面近傍の情報が得られる
- ・ 計算コストが少ない



今後、本モデルの様々な流れ場への適用を検討し
CEAとの技術協力に資する予定である



2004年10月22日 R&C報告会

JNC

高速炉構造設計に用いる 12Cr鋼材料物性値の検討

要素技術開発部 新材料研究グループ
安藤勝訓*, 若井隆純, 青砥紀身
(*現在:原子炉第一課)

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

2004年10月22日 R&C報告会

JNC 12Cr鋼の実用化高速炉への適用

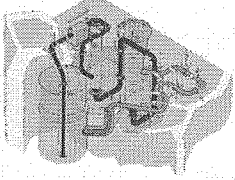
12Cr鋼の優位性

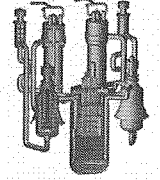
- ▶優れた高温強度
- ▶低熱膨張
- ▶高熱伝導率

550°Cにおける機械的性質

	引張強さ (MPa)	平均熱膨張 (°C)	熱伝導率 (W/m・K)
SUS304	346	18.3×10^{-6}	21.6
SUS316	401	18.3×10^{-6}	21.8
SUS410J3 (12Cr鋼)	397	11.3×10^{-6}	33.7

※カタログ値等より





1次系ホットレグ配管		
	もんじゅ	実用化高速炉 (Designed)
	SUS304	12Cr鋼
パイプ	39m	12m
エルボ	9	1

**熱応力が支配的である高速炉では、
12Cr鋼の採用により配管長短縮・機器コンパクト化が可能**

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC 既存材料強度基準での材料物性値

**BDS(もんじゅ設計基準)
DDS(実証炉設計基準(案))**

- ⇒ 縦弾性係数、熱膨張係数は、告示501号とASMEを元に多項式近似
- ⇒ ただしそれらは代表値の例示に留まり、その詳細に関する検討はされていない
- ⇒ 密度、比熱、熱伝導率は取上げられていない

告示501号, ASMEでの12Cr鋼の位置付け

※告示501号
12Cr: オーステナイト系以外のステンレス鋼

※ASME (Section II PartD)
熱膨張係数=12~13Cr
縦弾性係数=12~17Cr

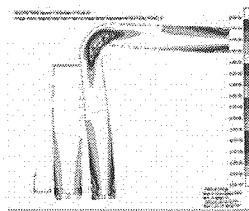
- ⇒ 告示501号, ASMEでは12Cr鋼のための材料物性値は存在しない

**構造材料において材料物性値の基準化に関する
議論を持たれたことはない**

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC 材料物性値に関する課題

近年の設計評価では有限要素法などを用いて、より精度の高い現実的な構造設計・評価を実施



12Cr鋼の良好な熱的特性を的確に反映した設計を行うためには、
構造設計で用いる材料物性値に関する検討が必要

実用化高速炉設計で枢要となる材料物性値(縦弾性係数、熱膨張係数等)の材料強度基準における取扱いについて検討

- 12Cr鋼材料物性値標準測定法の検討
- 提案標準計測法に従った12Cr鋼に関する材料強度基準掲載値の見直し

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

2004年10月22日 R&D報告会

JNC

材料物性値の測定法に関する調査・検討

※JNC TN9400 2003-0084
※H16, 春季材料学会にて詳細発表

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

2004年10月22日 R&D報告会

JNC 12Cr鋼材料物性値標準測定手法の検討

日本工業規格 (JIS)

- 縦弾性係数 (JIS Z 2280):
複数の試験方法を記載。(分析現場では近年、JIS以外の測定方法も多用)
- 熱膨張係数:
鉄鋼材料に関する規格はない。セラミックス (JIS R 1618)
- 比熱・熱伝導率:
鉄鋼材料に関する規格はない。セラミックス (JIS R 1611)
- 密度 (JIS Z 8807)
複数の試験方法を記載。

米国規格 (ASTM)

- 縦弾性係数: ASTM E 1875, ASTM E 1876
- 熱膨張係数: ASTM E 228, ASTM E 831
- 比熱・熱伝導率: ASTM E 1461, ASTM C 714,
- 密度: ASTM D792

**国内外の規格、国内動向の調査および測定メーカーとの議論
に基づき12Cr鋼材料物性値標準計測法の検討**

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC

縦弾性係数測定方法

化学成分、熱処理条件の異なる商用12Cr鋼ヒートを用いた検討

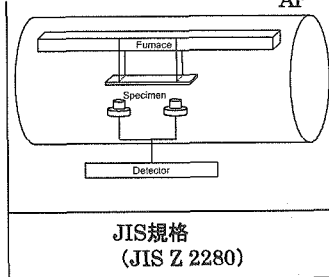
縦弾性係数測定

	測定原理	試験法	再現性	高温での精度	JIS	ASTM	備考
動的手法	共振法	自由共振法	◎	○	JIS Z 2280	ASTM E 1876	
		片持ち共振法	◎	○	×	×	簡易
	超音波法	超音波法	◎	○	JIS Z 2280	ASTM E 1875	
静的手法	力学的手法	応力-ひずみ応答	×	×	JIS Z 2280	ASTM E 111	

$$f = \frac{a^2}{2\pi \times l^2} \sqrt{\frac{E \times i}{\rho \times A}}$$

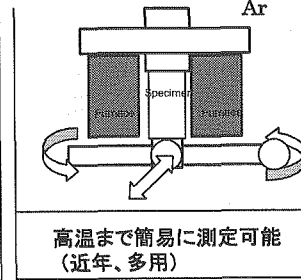
- f : 共振法の一次共振動数(s⁻¹)
- a : 境界条件による定数
- l : 試験片長さ(mm)
- E : 縦弾性係数(N/mm²)
- i : 断面2次モーメント(mm⁴)
- ρ : 密度(kg/mm³)
- A : 断面積(mm²)

自由共振法



JIS規格
(JIS Z 2280)

片持ち共振法



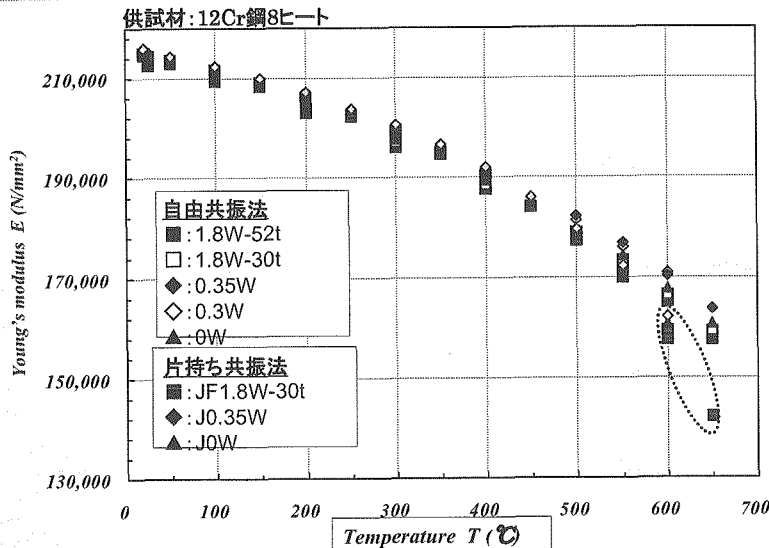
高温まで簡易に測定可能
(近年、多用)

共振法により縦弾性係数を測定

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

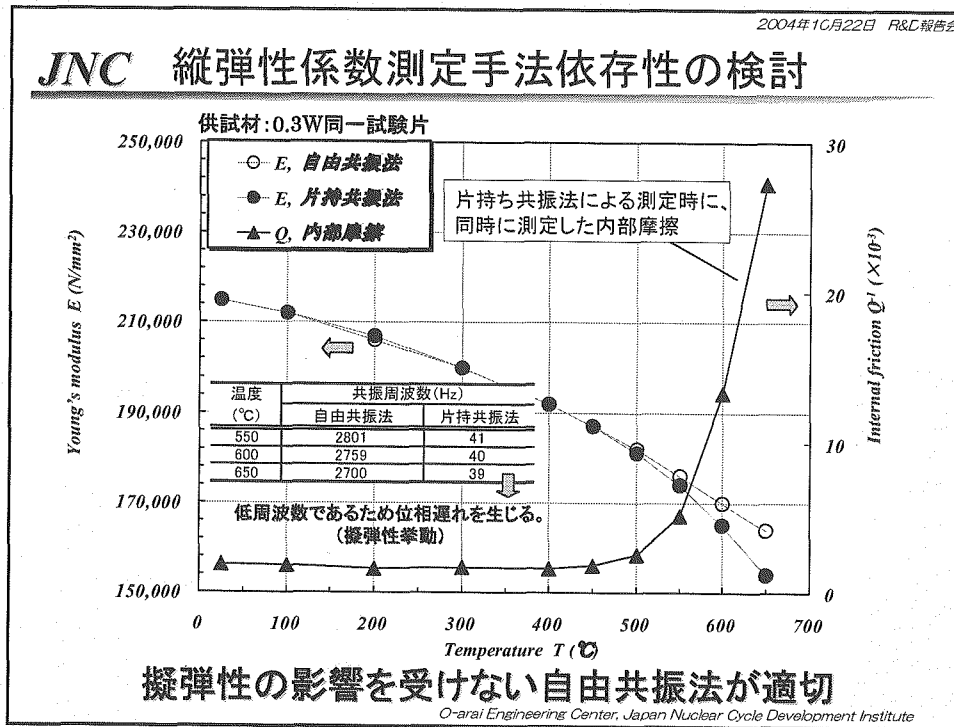
JNC

縦弾性係数測定結果



高温で測定手法依存性が生じる

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute



2004年10月22日 R&D報告会

JNC 熱膨張率測定方法

熱膨張測定法

	規格	試験法	材料	試験片寸法(mm)	昇温速度
相対測定法	JIS R 1618	熱機械分析	セラミックス	φ, □ ≒ 5 L=10 or 20	<10°C/min
	JIS G 5511	熱機械分析 (製品仕様確認)	鉄系低膨張鑄造品	φ 5 × L20	3°C/min
	ASTM E 228	熱機械分析	固体 (Solid)	φ 5~10 L=25±0.1	<3°C/min
	ASTM E 831	石英熱膨張計	固体 (Solid)	φ, □ <10 L=2~10	5°C/min
絶対測定法	JIS R 3251	レーザー干渉法	ガラス	図示	-
	ASTM E 289	干渉法	固体 (Solid)	図示	-

試験条件 (JIS R 1618準拠)

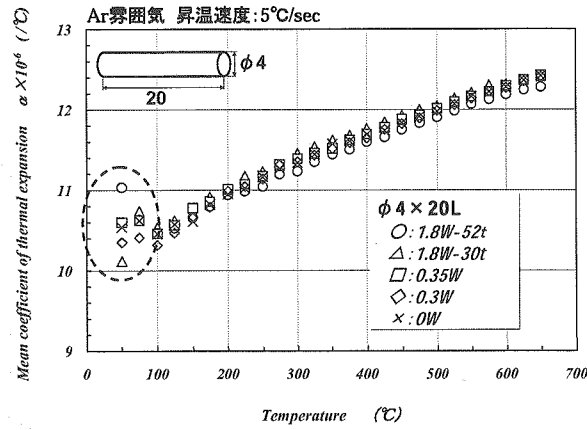
雰囲気 : Ar
昇温速度 : 5°C/min

鉄鋼材料に対する測定法はJISでは規格化されていない

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC

熱膨張率測定結果(φ4×20L)

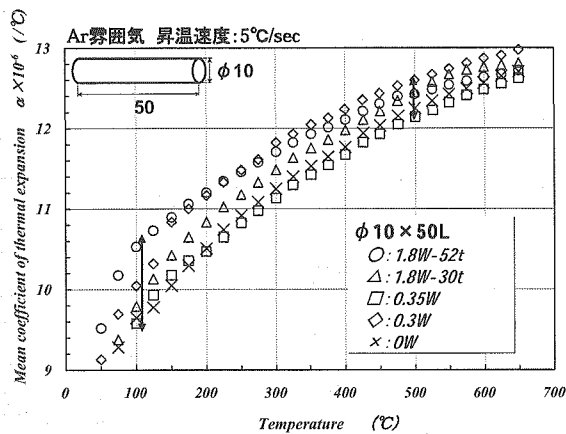


低温でのばらつき大きい
試験片初期寸法測定誤差に起因

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC

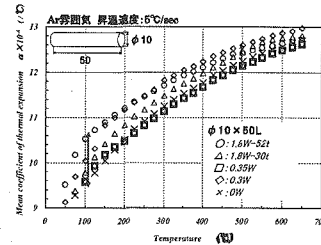
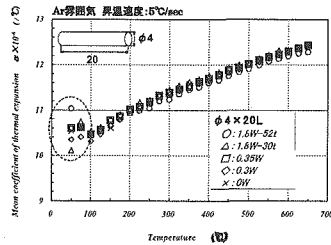
熱膨張率測定結果(φ10×50L)



全温度域でばらつき大きい
試料の均熱状況に起因

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC 熱膨張率測定結果の試験片寸法依存性の検討

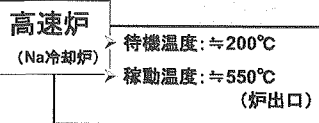


▶ 小型試験片

→ 初期寸法測定誤差の影響を受け易い
: 低温の測定値で誤差が大きい

▶ 大型試験片

→ 均熱状況の影響を受け易い
: 全温度域でばらつき大きい



小型試験片により測定し、
低温での値を除いたデータより設計値を与えることが適切

JNC 密度, 比熱・熱伝導率測定方法

密度

	規格	試験法	材料	試験片寸法 (mm)
アルキメデス法	JIS Z 8807	液中秤量	鉱工業にて固体	
	JIS Z 8807	固体比重天秤法	鉱工業にて固体	
	JIS K 0061	天秤法	化学製品	約5g
	ASTM D 792		固体 (Solid)	1~5g

比熱・熱伝導率

	規格	試験法	材料	試験片寸法 (mm)
相対測定法	JIS R 1611	レーザーフラッシュ法	セラミックス	φ8~10もしくは凸多角形の平板で、厚さ4mm以下
	ASTM E 1461	レーザーフラッシュ法	固体 (Solid)	φ6~18で厚さ1.5~4mm
	ASTM C 714	レーザーフラッシュ法	カーボン	φ6~12で、厚さは2~4mm
絶対測定法	ASTM E 1952	DSC法	固体 (Solid)	

密度, 比熱・熱伝導率測定手法の検討および測定

JNC

標準的材料物性試験方法の提案

	測定手法	試験片形状	温度	雰囲気	繰返し数
縦弾性係数	自由共振法	2×10×60	± 0.5℃	Ar	3回以上
熱膨張係数	押棒式変位検出法	Φ4×20	± 0.5℃	Ar	1回
密度	アルキメデス法	10~30g	25℃±3℃	蒸留水	3回以上
比熱	レーザフラッシュ法	Φ10×2	±3℃	真空 or Ar	3回以上
熱伝導率					

※その他、詳細条件あり

標準的12Cr鋼材料物性試験方法の提案

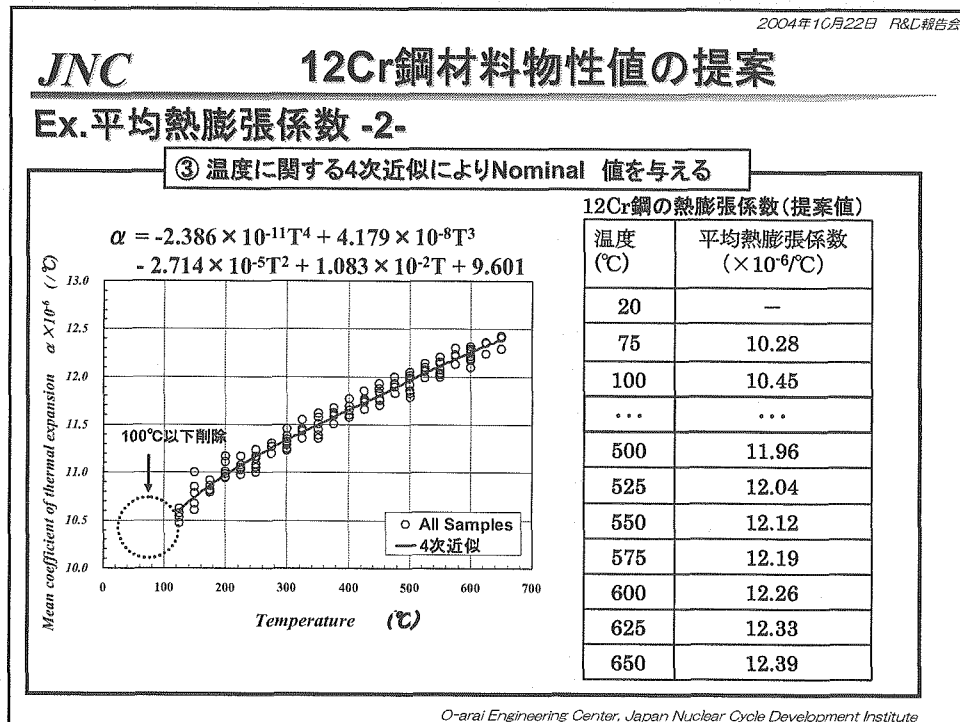
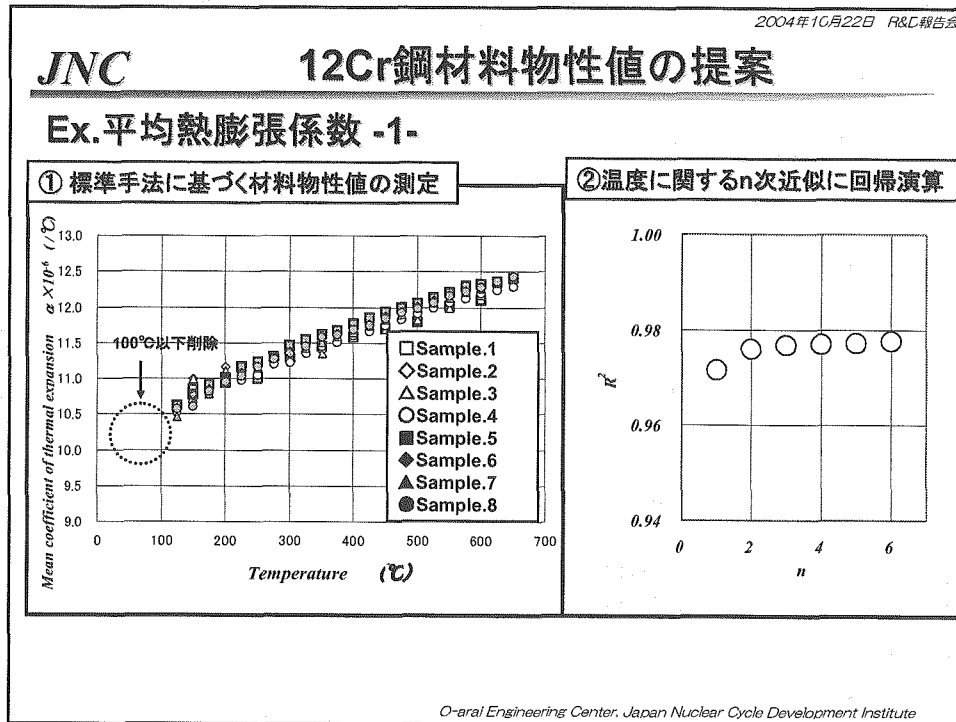
O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC

高温構造設計に用いる12Cr鋼材料物性値の提案

※JNC TN9400 2003-0084

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

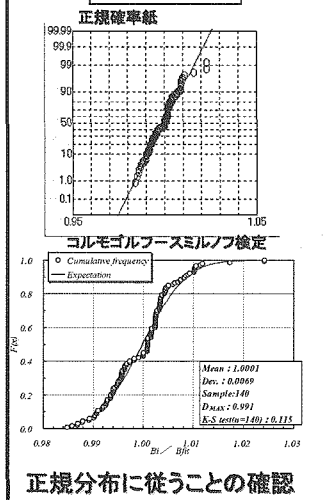


JNC

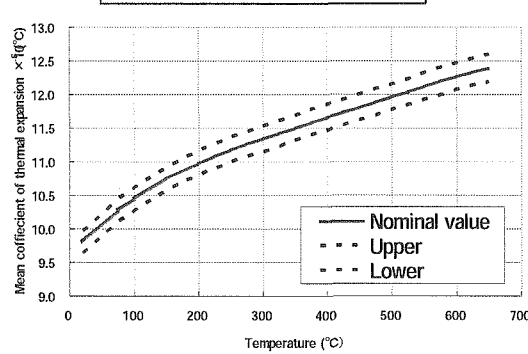
測定結果の検証

Ex. 平均熱膨張係数 -3-

④ 分散評価



⑤ 材料物性値の分散の把握



→データ数の増加に伴う、暫定案の見直し判断

※同じ母集団と見なせるのであれば改定の必要なし

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC

12Cr鋼材料物性値の算出法

○ 各種材料物性値に関して前述と同様の手法により評価、材料物性値を提案

	算出法	関数
縦弾性係数	温度に関する4次の近似式	$E = -2.011 \times 10^{-10}T^4 + 2.322 \times 10^{-7}T^3 - 1.563 \times 10^{-4}T^2 - 2.405 \times 10^{-2}T + 2.147 \times 10^2$ (N/mm ²)
瞬時熱膨張係数	温度に関する3次の近似式	$\alpha_A = 1.814 \times 10^{-13}T^4 - 4.426 \times 10^{-10}T^3 + 6.038 \times 10^{-7}T^2 + 9.683 \times 10^{-4}T - 2.590 \times 10^{-02}$ (°C)
平均熱膨張係数	温度に関する4次の近似式	$\alpha_B = -2.386 \times 10^{-11}T^4 + 4.17910^{-8}T^3 - 2.71410^{-5}T^2 + 1.08310^{-2}T + 9.60110$ (°C)
密度	RT平均値	$\rho = 7.80$ (g/cm ³)
比熱	温度に関する4次の近似式	$C = 2.136 \times 10^{-12}T^4 - 1.098 \times 10^{-9}T^3 + 2.577 \times 10^{-7}T^2 + 4.162 \times 10^{-4}T + 4.416 \times 10^{-1}$ (J/g·K)
熱伝導率	温度に関する4次の近似式	$\lambda = -9.846 \times 10^{-11}T^4 + 1.263 \times 10^{-7}T^3 - 6.280 \times 10^{-5}T^2 + 2.384 \times 10^{-2}T + 23.19$ (W/m·K)

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC 高速炉構造設計に用いる12Cr鋼材料物性値

12Cr鋼の縦弾性係数(提案値)		12Cr鋼の熱膨張係数(提案値)			12Cr鋼の密度(提案値)	
温度(°C)	縦弾性係数(N/mm ²)	温度(°C)	瞬間熱膨張係数(×10 ⁻⁶ /°C)	平均熱膨張係数(×10 ⁻⁶ /°C)	温度(°C)	密度(g/cm ³)
20	214000	20	9.92	—	20	7.80
75	212000	75	10.52	10.28		
100	211000	100	10.77	10.45		
...		
500	180000	500	13.31	11.96		
525	177000	525	13.41	12.04		
550	174000	550	13.52	12.12		
575	171000	575	13.62	12.19		
600	168000	600	13.72	12.26		
625	165000	625	13.82	12.33		
650	161000	650	13.92	12.39		

12Cr鋼の比熱と熱伝導率(提案値)		
温度(°C)	比熱(J/kg·K)	熱伝導率(W/m·K)
20	0.450	23.64
50	0.468	24.24
...
550	0.761	29.31
575	0.791	29.38
600	0.824	29.41
625	0.860	29.37
650	0.901	29.26

平成17年度に提示予定の12Cr鋼材料強度基準(暫定案)

- ・別表1.8 縦弾性係数
- ・別表1.10 熱膨張係数
- ・追加表 物性値
(密度、比熱、熱伝導率)

として掲載予定

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC

結論

実用化FBR用機器・構造用材料として検討されている12Cr鋼において、高温構造設計の基礎となる材料物性値に関して種々の検討、調査、測定を行い、以下の結論を得た。

12Cr鋼材料物性値標準測定手法の提案

- ・ 縦弾性係数に関しては、自由共振法により測定した値を高速炉構造設計に適用することを推奨する。
- ・ 熱膨張率は、φ4×20mmの試験片を用いた押し棒式変位検出法による測定を行うことを推奨する。ただし、低温での測定値は、試験片寸法の測定誤差の影響が大きいことから、提案値の算出において除外する。

12Cr鋼材料物性値(基準値)の提案

- ・ 適切と考えられる測定手法、データ処理に基づき、12Cr鋼材料物性値を提案した。
- ・ 各材料物性値における測定値の統計的評価を行った結果、今回測定した12Cr鋼の材料物性値のヒート間差は大きくなく、それらは同一の母集団に属するデータと見なしうることがわかった。このことから本件における12Cr鋼材料物性値提案のベースとなった測定値の信頼度は高いと考えられる。

O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

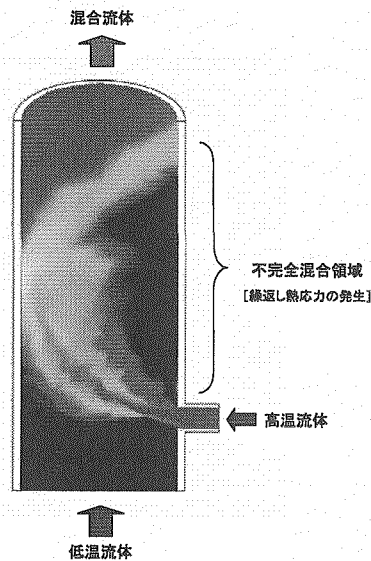
平成16年度 第5回研究開発報告会

Na中高サイクル熱疲労試験 (SPECTRA)の現状

平成16年10月22日

新技術開発試験グループ
長谷部慎一

高サイクル熱疲労現象



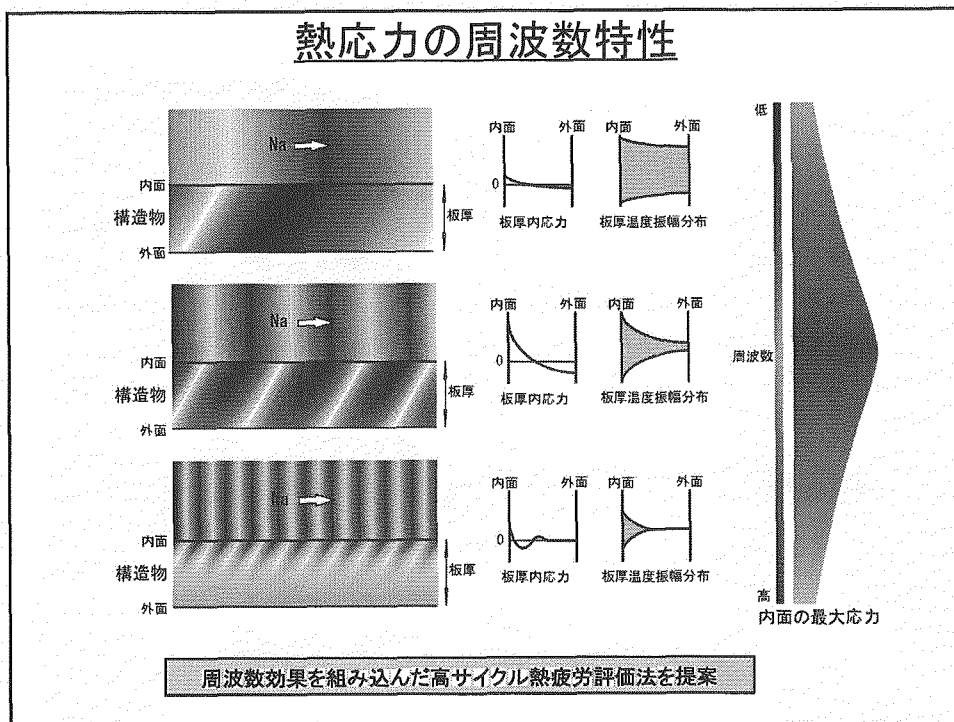
温度の異なる流体が合流して温度ゆらぎが生じる領域では、温度変動によって構造材に高サイクル熱疲労が発生する。

Naのように熱伝達率の高い流体では、温度変動が伝搬し易くなることから、高サイクル熱疲労現象に注意する必要がある。

【主な影響因子】

- ・流体: 温度振幅、流量、周波数、波形...
- ・構造: 板厚、形状、溶接部、表面粗さ...
- ・材料: 物性、疲労強度、残留応力...

※温度変動の周波数に依存する熱応力に注目



研究目的

- (1)周波数に着目した高サイクル熱疲労評価法の検証
- (2)検証に必要な温度応答及び強度データの取得
- (3)流体の温度変動に起因する破損メカニズムの解明

↓

周波数の異なる正弦波状の温度変動を発生させ、試験体にき裂を発生・進展させることができる高サイクル熱疲労試験装置(SPECTRA)を開発し、試験研究に着手した。

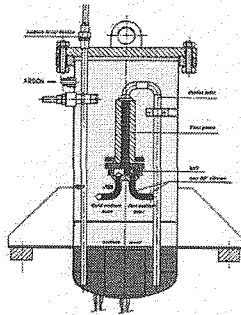
SPECTRA: Sodium Temperature Controlled Thermal Fatigue Test Equipment

開発Gr
試験・検査

↔

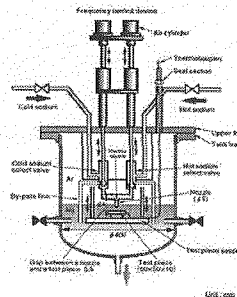
構造Gr
解析・評価

他機関のNa試験装置



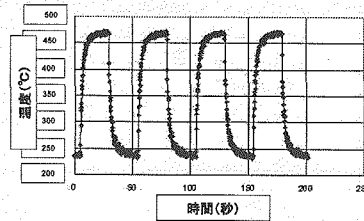
仏国CEA/FAENA装置

機械弁と電磁ポンプの組み合わせによるNa流量制御



日立製作所/TIFFSS装置

機械弁によるNa流量制御

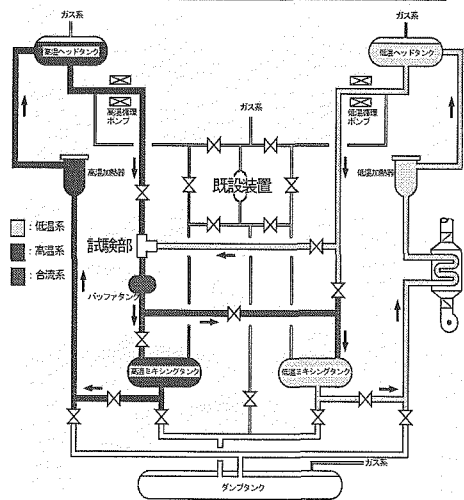


Na温度変動挙動

連続的な制御が困難であることから、
機械弁によるNa流量の制御を排除

SPECTRAの概要

熱疲労き裂の発生と進展に及ぼす影響
因子を把握するための要素試験装置

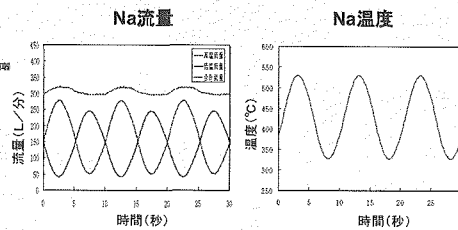


運転温度：高温系600°C、低温系250°C

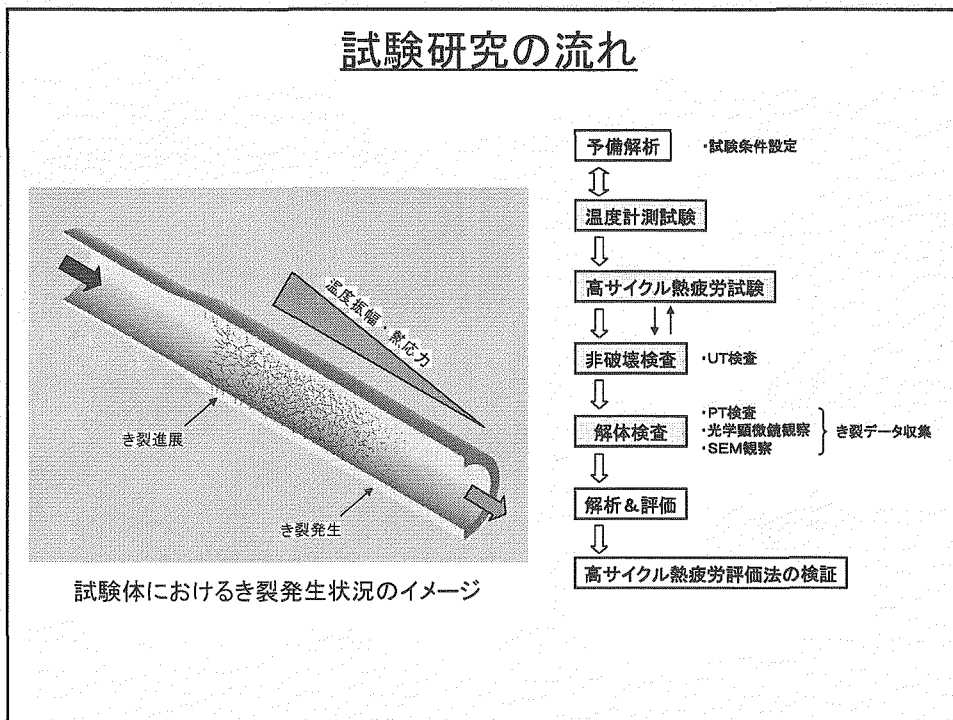
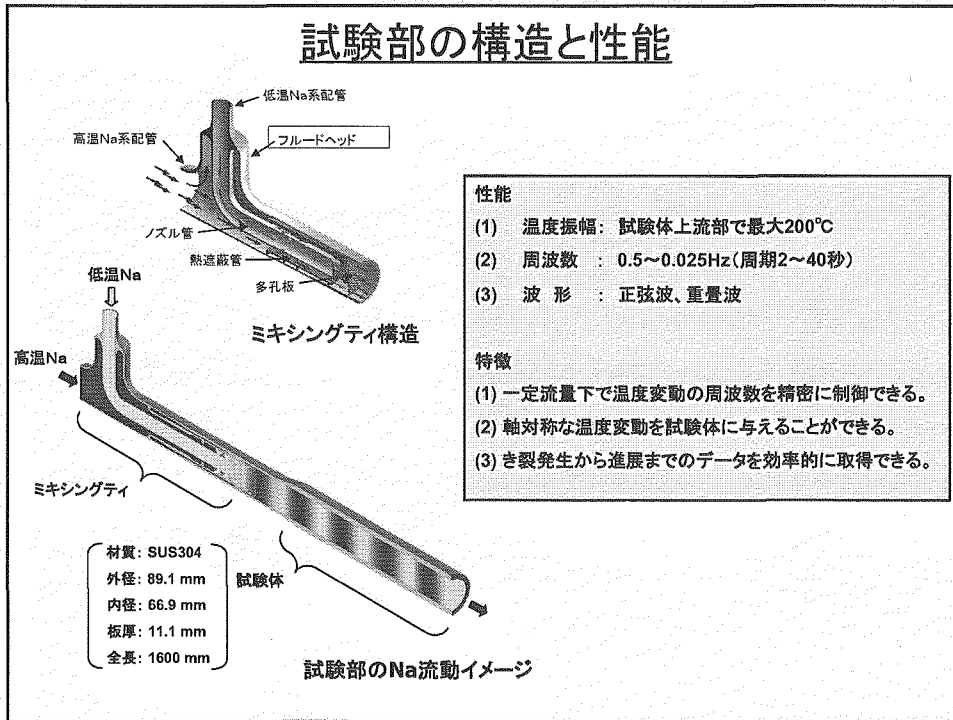
Na不純物：酸素濃度6ppm、炭素濃度<2ppm

Na充填量：約11m³

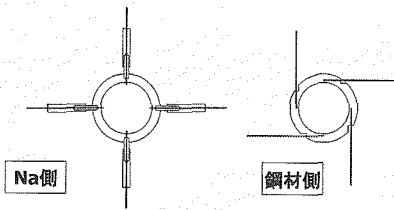
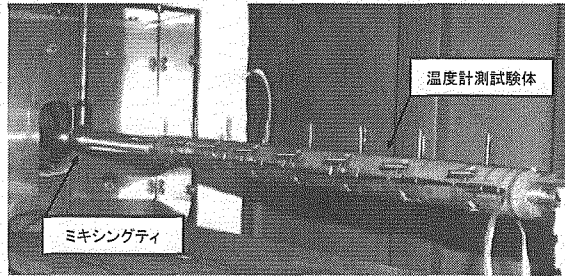
制御方法：電磁ポンプの電圧調整で高温/低温Na流量の割合を連続的に制御し、合計流量の和を一定としながら、スムーズな正弦波状の温度変化を発生させる。



他機関のNa試験装置に比べて精密な温度制御が可能



温度計測試験



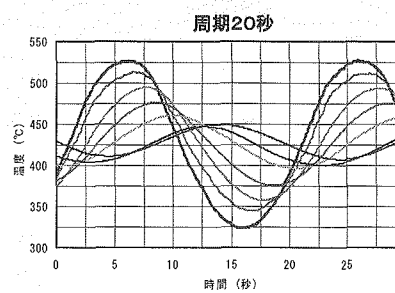
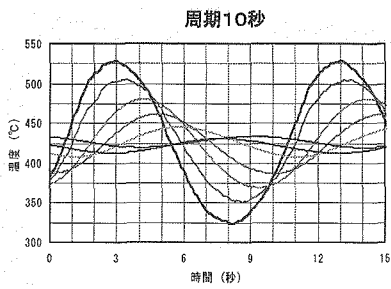
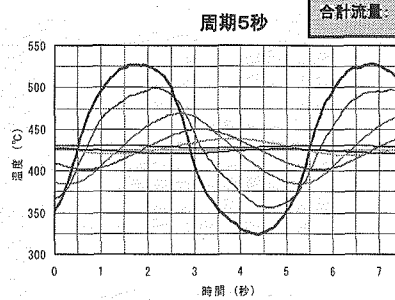
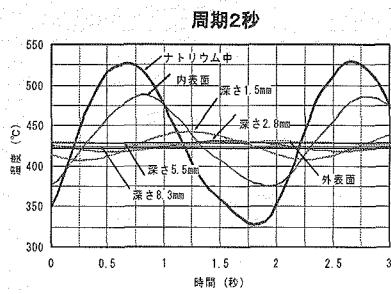
熱電対の取付け方法

		径方向	周方向
Na側	3 mm		0°, 90°, 180°, 270°
	1 mm		180°
	内表面		0°
鋼材側	1.5 mm		0°, 90°, 180°, 270°
	2.8 mm		0°, 90°, 180°, 270°
	5.5 mm		0°
	8.3 mm		180°
	外表面		0°

シース型熱電対(1mmφ): 各ブロック17点

試験体上流部の温度変動

温度振幅: 200°C
合計流量: 300L/min



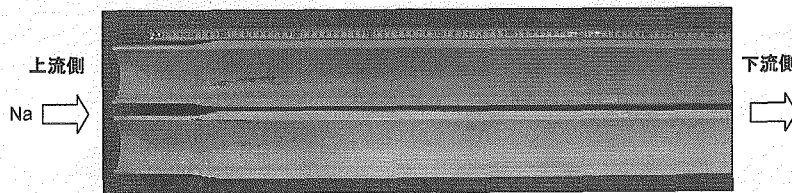
試験条件および試験結果

Na流動条件	波形	正弦波				
	温度振幅	200 °C (最大 525°C、最小 325°C、平均 425°C)				
	合計流量	300 l/min				
	周期	2秒	5秒	10秒	20秒	40秒
SUS304試験体の強度予測 -上流部-	発生応力	513 MPa	591 MPa	626 MPa	634 MPa	594 MPa
	ひずみ範囲	0.368 %	0.434 %	0.465 %	0.472 %	0.437 %
	き裂発生サイクル	750,000	260,000	170,000	150,000	190,000
試験結果	き裂貫通サイクル	94,005 *	156,560 *	未実施	157,150	未実施

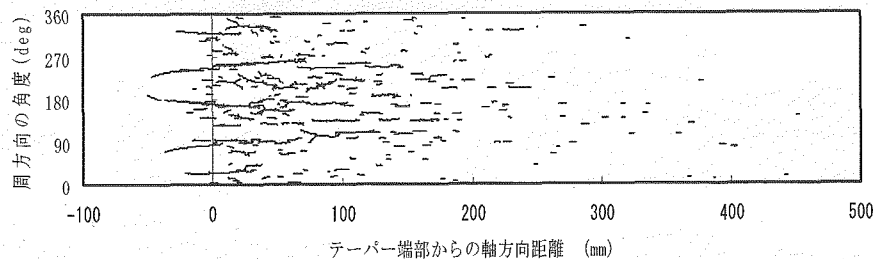
* 試験体上流の入口配管で破損

周期20秒試験結果(き裂発生分布)

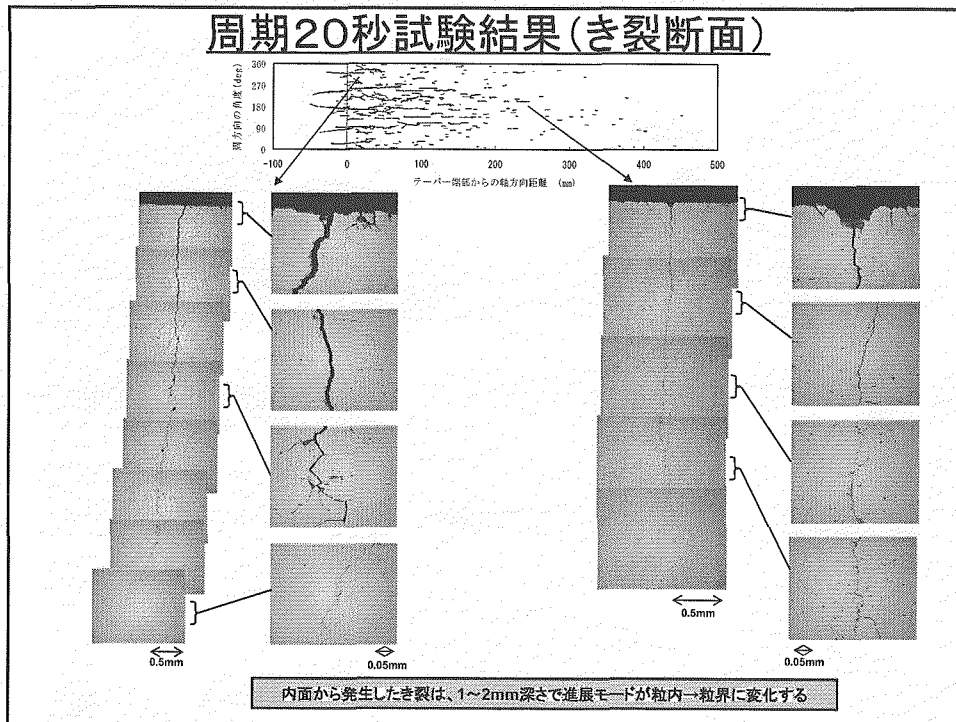
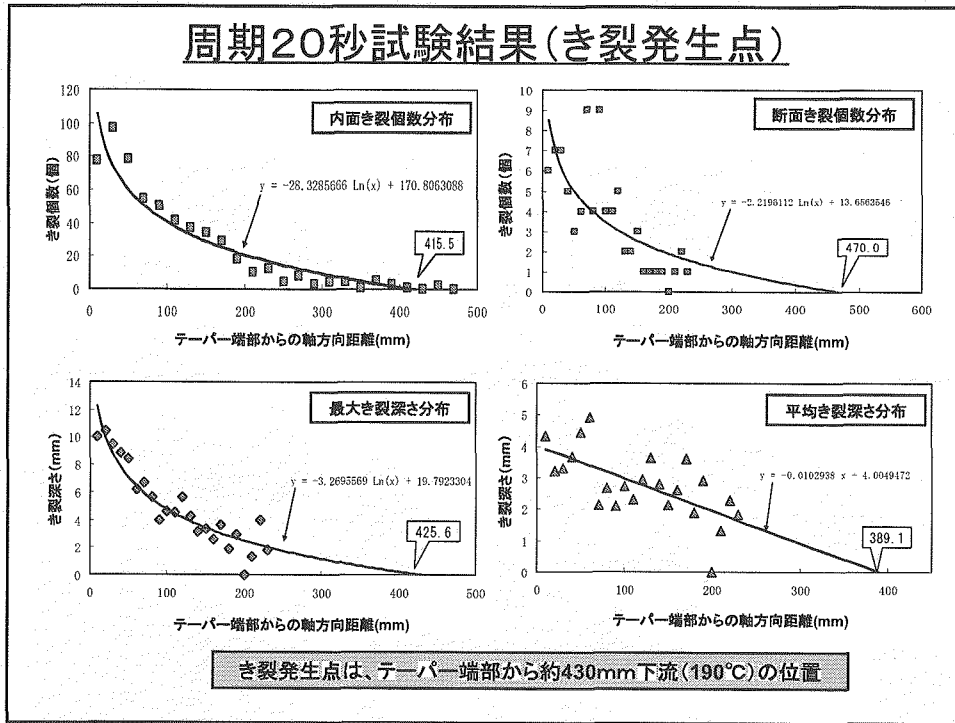
き裂は157,150サイクルで試験体を貫通

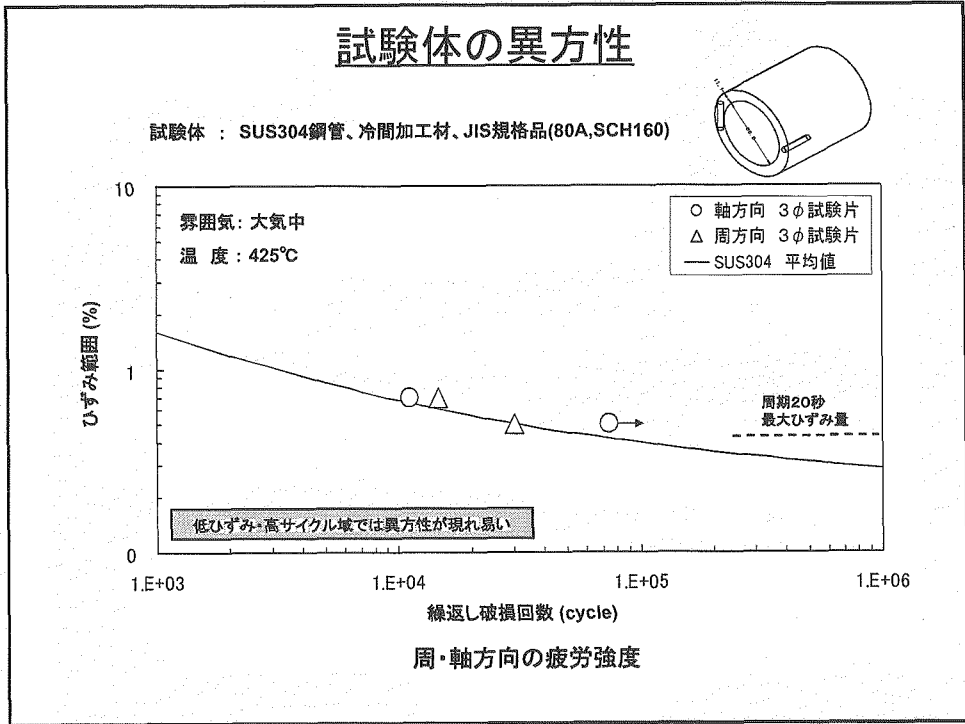
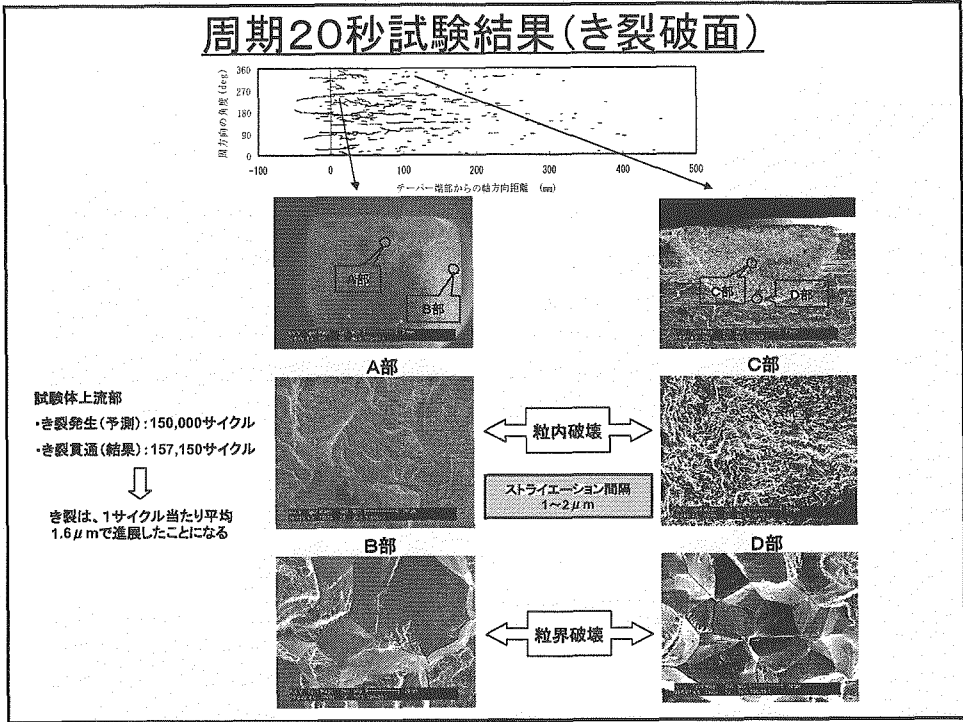


試験体内面のPT検査

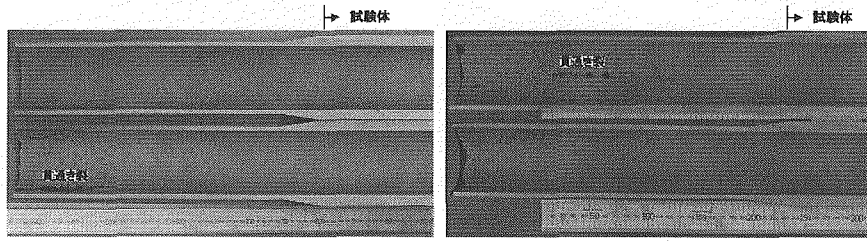


試験体展開図



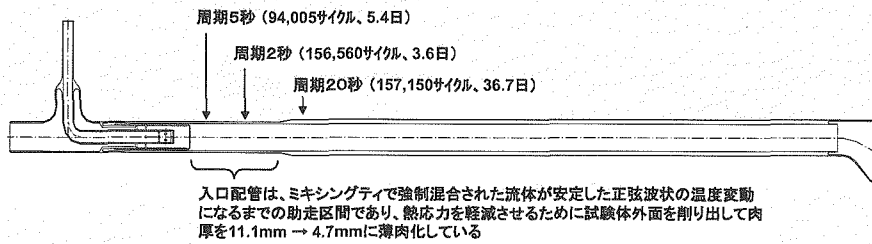


周期2秒、5秒試験結果

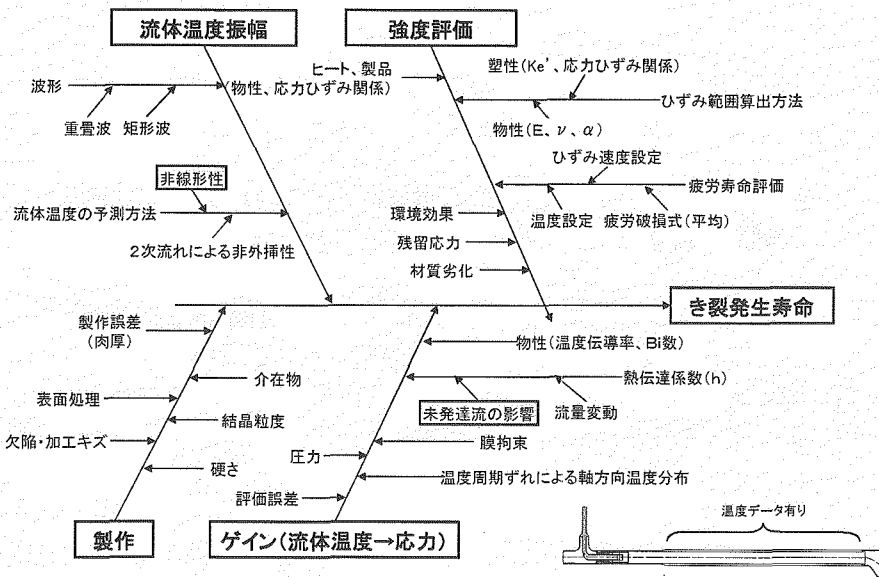


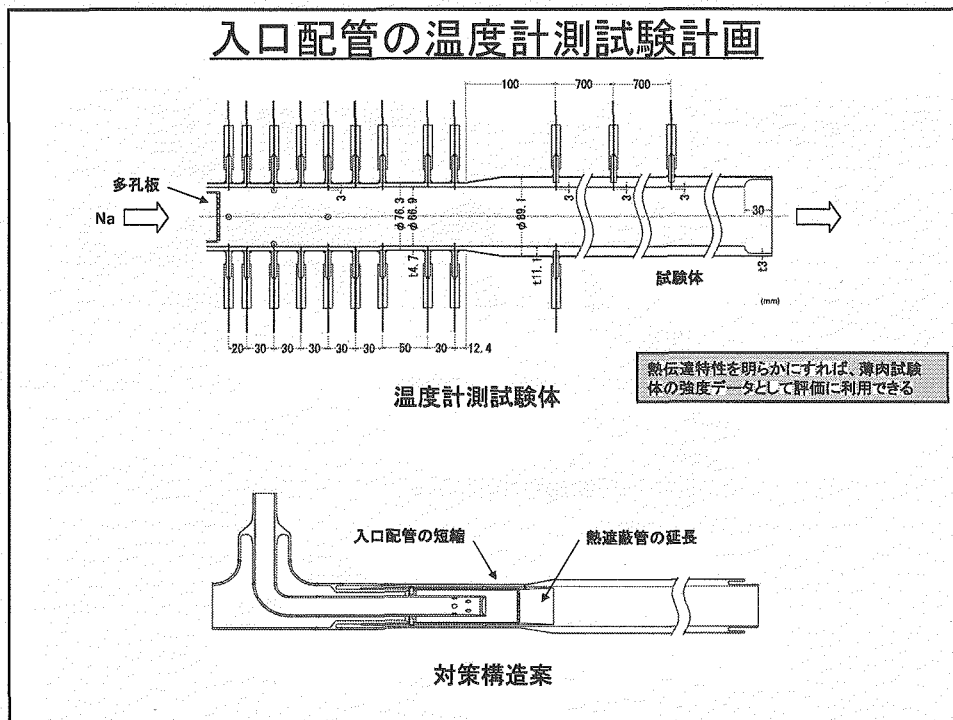
周期5秒のき裂発生状況

周期2秒のき裂発生状況



入口配管の破損要因





まとめ

- (1) SPECTRAにより周期20秒の温度変動を試験体を与えて、評価法の検証に有効な強度データを得ることができた。
- (2) 軸方向に沿ったき裂は、低ひずみ・高サイクル域で現れ易くなる試験体の異方性が原因であることが明らかになった。
- (3) 周期2秒、5秒では、試験体入口配管の薄肉部で破損した。上流域を対象とした温度計試験によって原因を究明し、破損防止対策を施してから試験を再開することになった。

第6回 R&D報告会

[平成17年1月28日]

次世代個人線量計の選定

放射線管理課
橋本義大*、橋本 周
石川正康、江森修一

*現在セルナック株式会社

Investigation on Performance of New Type Dosimeters

背景

- 大洗工学センターにおける、TLDバッジによる個人線量の評価手法は、導入から約20年が経過した。近い将来に、これらの装置の更新が予想される。
- 統合に伴う、個人被ばく管理手法の全体的な見直しも視野に入れる。
- 個人線量計については、多くの新しい技術が導入されており、施設や作業の特徴、管理手法に合ったタイプを選定するべきである。

28Jan/2005 R&D Meeting OEC/JNC

報告の流れ

- 大洗工学センターの個人被ばく管理の現状と現行の個人線量計の紹介
- 個人線量計の必要条件
- 新しい個人線量計の紹介
- 新しい個人線量計の性能・機能比較
- 分野別評価、総合評価

大洗工学センターの 個人被ばく管理の現状

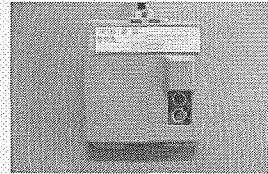
- 管理対象者数
 - 1319人(平成15年度実績)
- 測定回数
 - 3371回(自社員953件、外来2418件)(平成15年度実績)
- 管理対象施設
 - 全13施設
 - 原子炉施設(常陽、DCA、JWTF)
 - 核燃料物質取扱施設(JWTF、IRAF、WDF、AGF、MMF、FMF)
 - 放射性物質取扱施設(Na分析棟、安管棟、放管棟、FSI、MELT)

現行の個人線量計(1)

- TLD (Thermoluminescence Dosimeter)

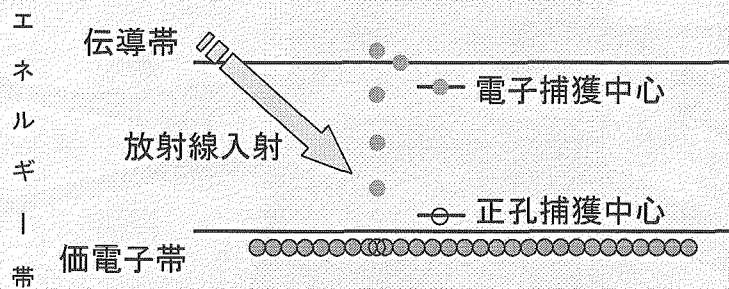
測定線種: γ 線、 β 線、n 線

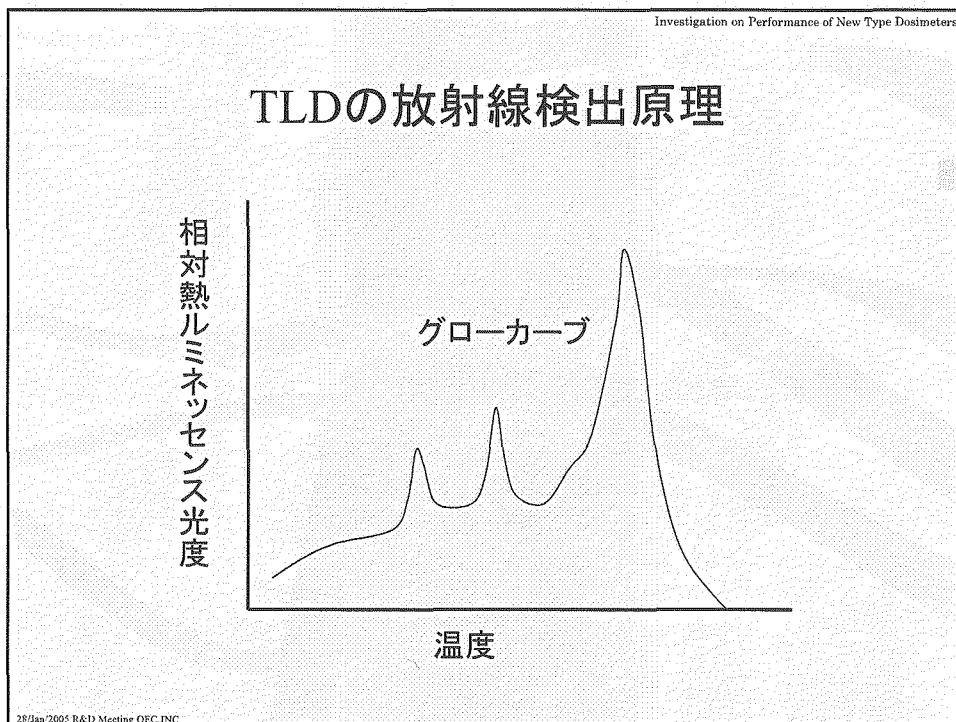
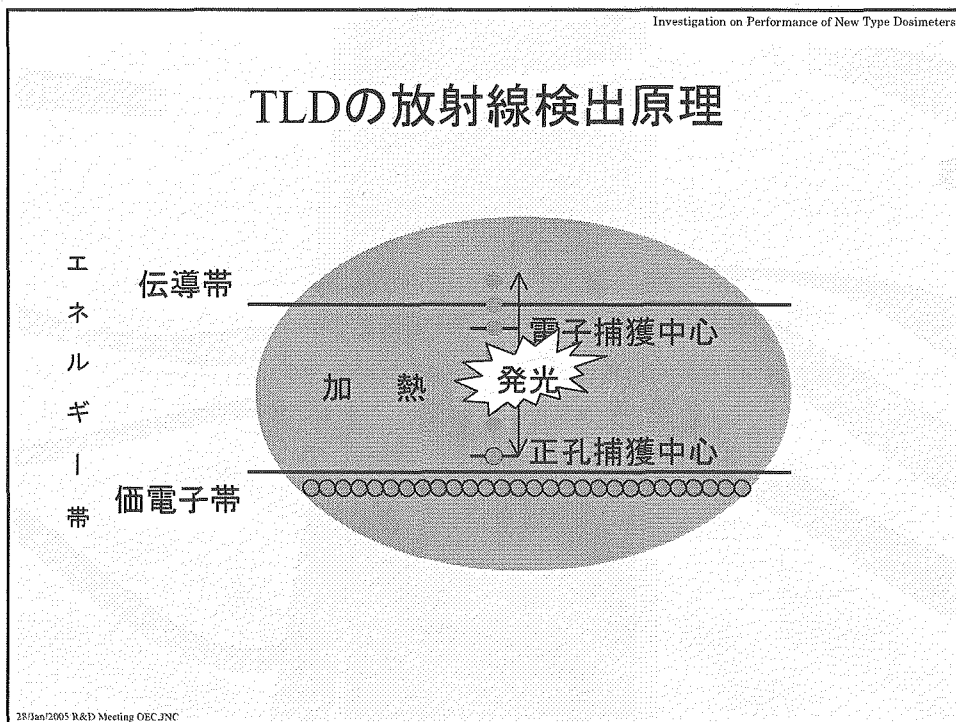
測定下限: 0.1mSv



専用のリーダーで、使用期間中の累積線量を読み取り

TLDの放射線検出原理





現行の個人線量計(2)

(補助線量計)

使用期間中の信号を記録し、線量として表示

- APD (Alarming Personal Dosimeter)

- シリコン半導体検出器使用

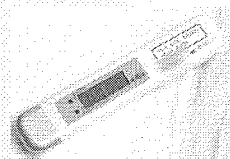
- 測定線種: γ 線 測定下限: 0.01mSv



- EPD (Electrical Pocket Dosimeter)

- シリコン半導体検出器使用

- 測定線種: γ 線 測定下限: 0.01mSv



作業管理や一時立入者・見学者の被ばく管理に使用

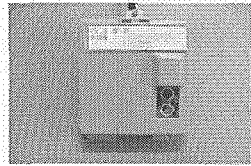
大洗における個人線量計の必要条件

- 携帯性
- 大量使用(1000台以上の同時使用、年間のべ3000件~5000件程度測定、迅速な評価)
- 0.1mSv以上の感度(現行管理と同等)
- 均一な感度特性(繰返し使用毎、ロット毎)
- 安定した感度特性(使用期間中、使用条件毎)
- 施設によって異なる管理対象線種やエネルギー範囲に対応
- 利便性(期間毎管理、作業毎管理)

新しい線量計(1)

- 新型TLD(Thermoluminescence Dosimeter)
 - 測定方法は現状のTLDと同様
 - 素子の工夫($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ の組成均一化)
 - 捕獲中心の均等化
 - リーダーの改良
 - グローカーブの特性の良化

測定下限が0.03mSvに改善

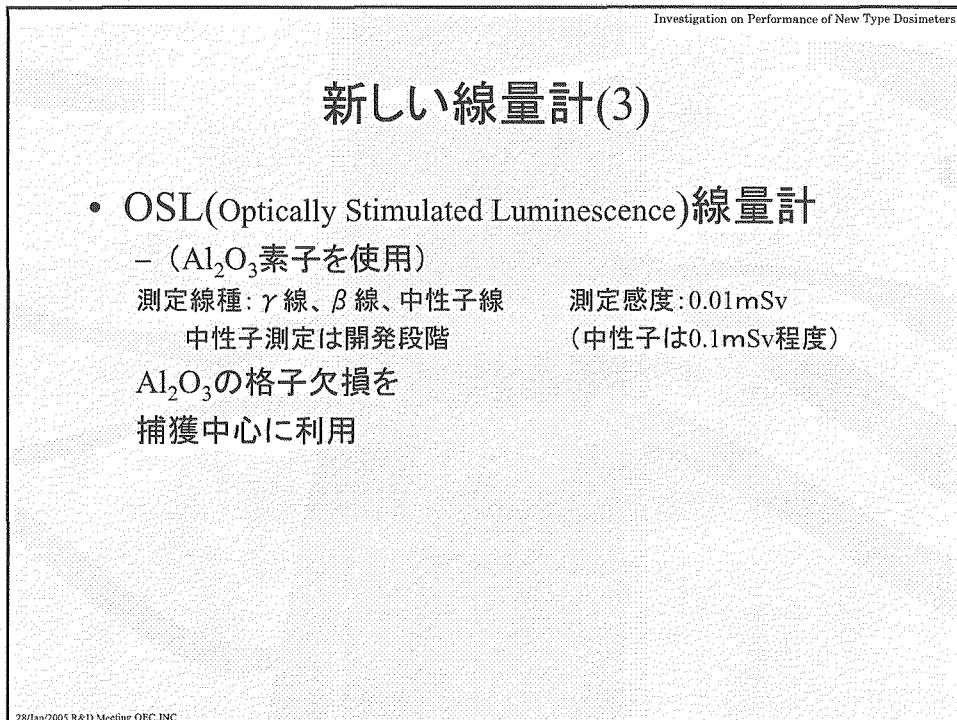
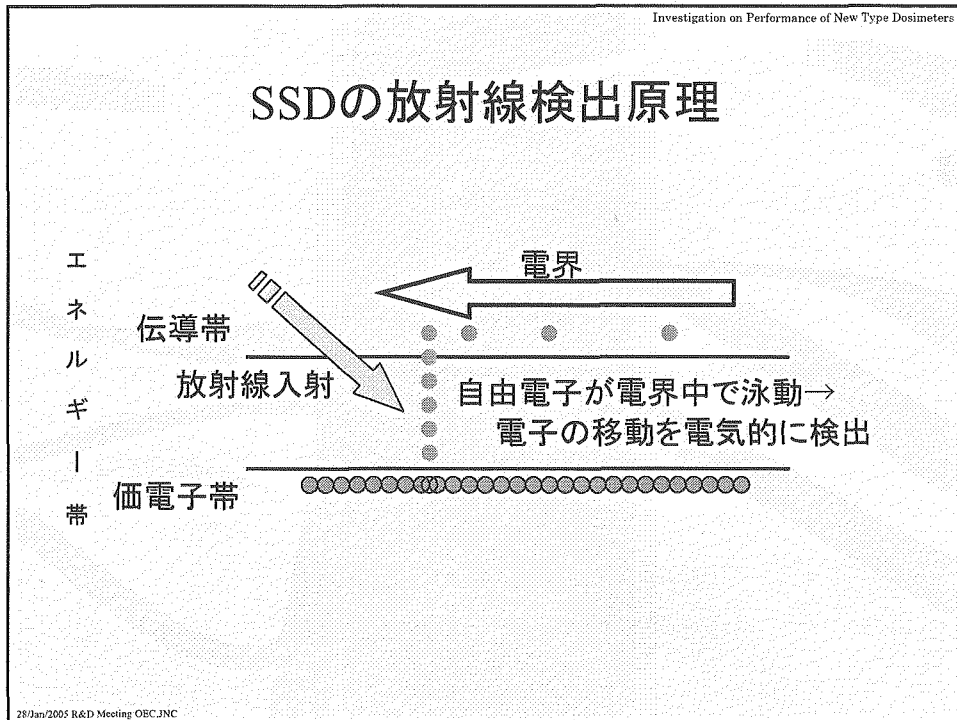


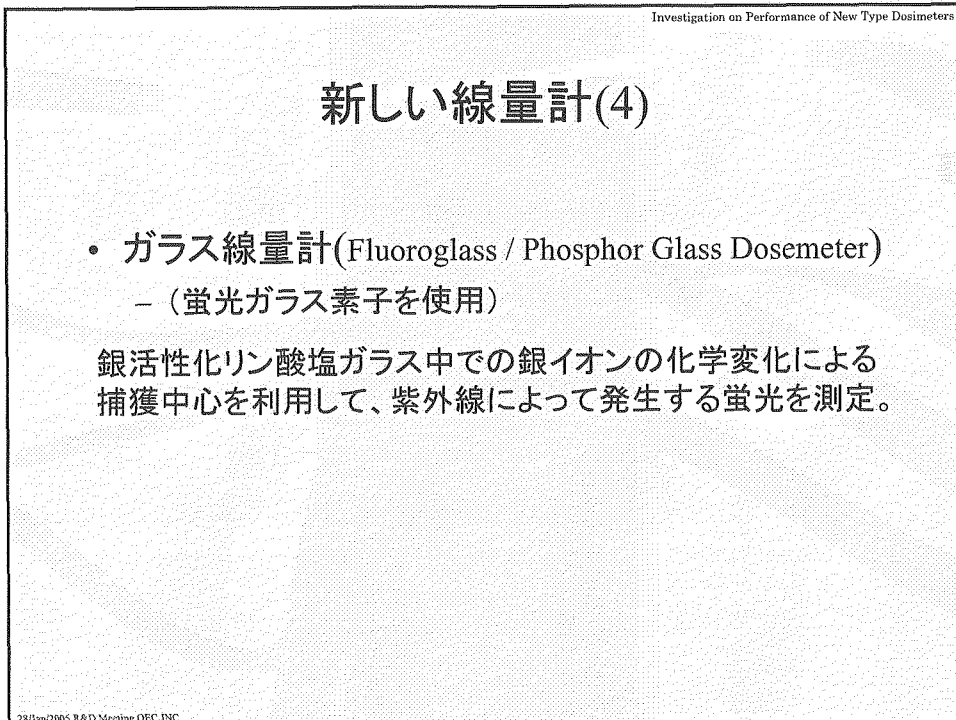
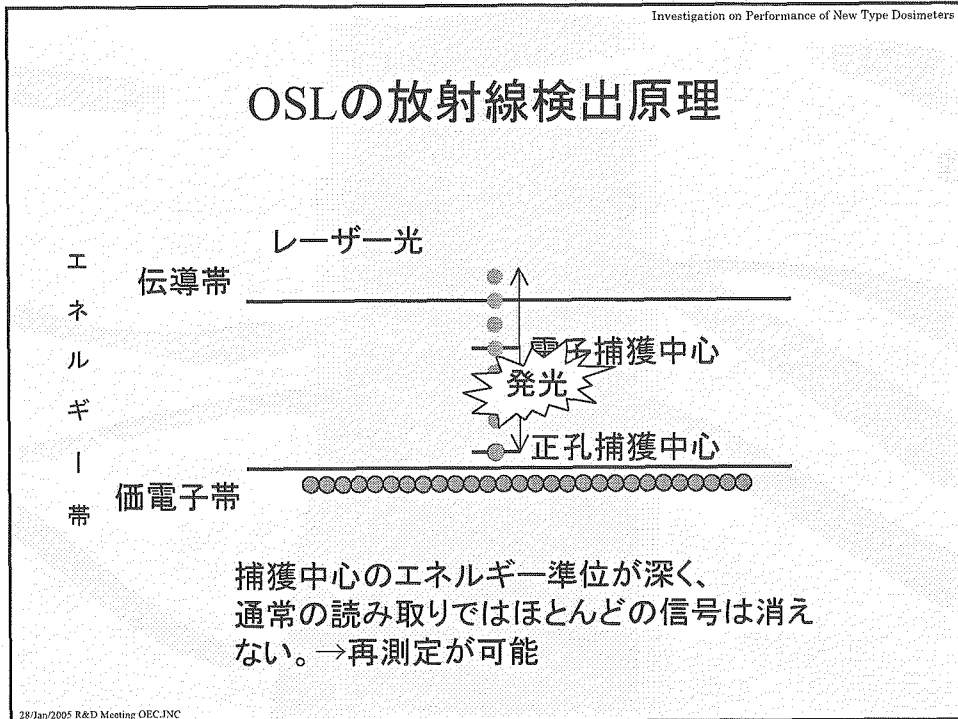
新しい線量計(2)

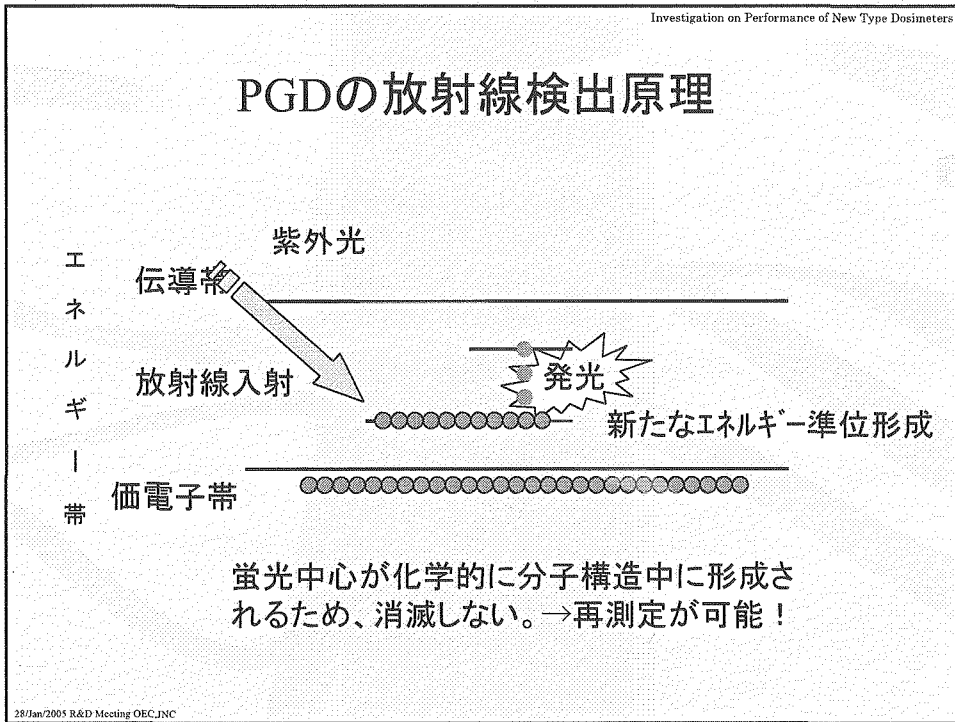
- EPD(Electrical Pocket Dosimeter)
 - シリコン半導体検出器(Silicon Semiconductor Detector)を使用。
 - 筐体の工夫により、 β 線や中性子線も測定可能
 - 測定線種: γ 線、 β 線、中性子線 測定感度: 0.01mSv

測定結果を容易にサーバに転送・処理

→作業管理に有利







Investigation on Performance of New Type Dosimeters

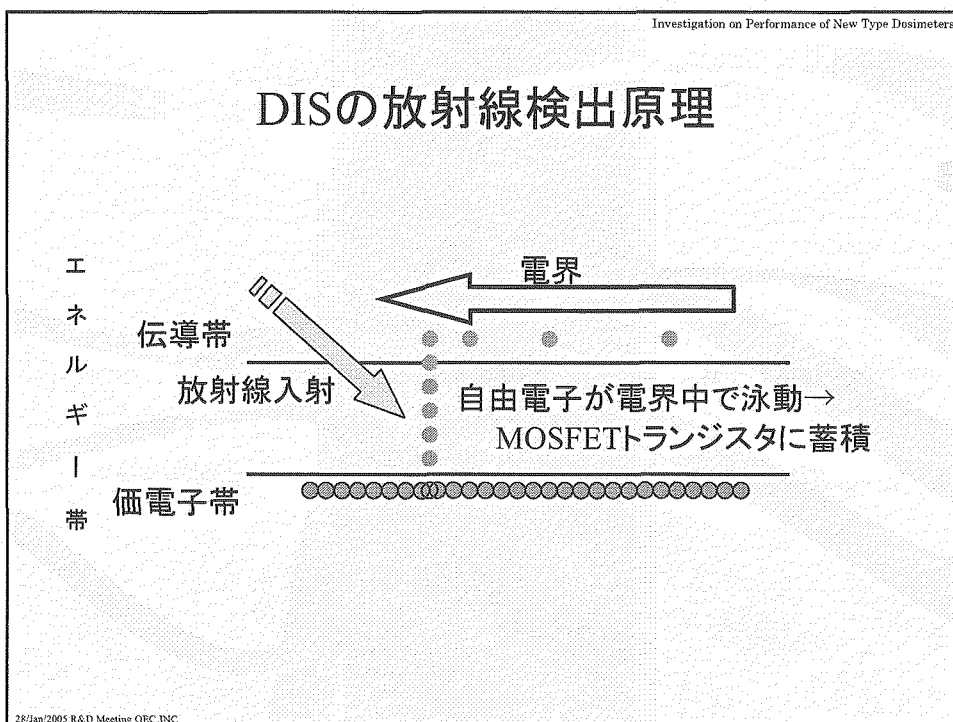
新しい線量計(5)

- DIS(Direct Ion Storage)線量計

生成電荷を不揮発メモリ(フラッシュメモリ/ROM)に直接保存

測定結果を電氣的に転送・処理
→被ばく管理の効率化の期待

28/Jan/2005 R&D Meeting OEC,JNC



Investigation on Performance of New Type Dosimeters

新しい線量計(6)

- 固体飛跡検出器(SSTD)

ポリカーボネートやADCプラスチック (Allyl Diglycol Carbonate, 通称CR39) が、 α 線などの重荷電粒子によって受けた損傷の数を測定

測定の自動化が進み、個人線量計として使用が可能

28/Jan/2005 R&D Meeting OEC JNC

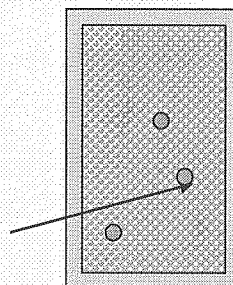
新しい線量計(7)

- **バブル線量計(Bubble Detector/Superheated Drop Detector)**

粘弾性高分子中に液滴を過膨張状態で保持。中性子の入射の刺激を受けて、気泡を生成。

測定線種: 中性子のみ

生体等価の基材が利用でき、
線量評価に有利



検討対象の選定(1)

- 新型TLD: β 、 γ 、n
- EPD: β 、 γ 、n
- OSL: β 、 γ
- PGD: β 、 γ
- ~~• DIS: β 、 γ → 大量処理に未対応~~
- SSTD: n
- ~~• バブル線量計: n → 実用段階に達していない~~

検討対象の選定(2)

• EPDの性能比較

		A社製	B社製	C社製	D社製
測定線種	γ	○	○	○	○
	β	○	×	○	○
	n	○	○	○	○
測定範囲		1 μSv-1 Sv	0.01 μSv-1 Sv	0.01 mSv-1 Sv	0.01 mSv-1 Sv
電池 (持続時間)		乾電池 (8h/d×1ヶ月)	リチウム電池 (連続1ヶ月)	リチウム電池 (連続16時間×3年間)	NiCd電池 (連続12時間×1年間)
警報機能		○	△	○	○
被ばく管理システム		×	×	○	○
耐電磁波		○	△	○	△

28Jan/2005 R&D Meeting OEC/JNC

性能調査(1)

• 線量再現性

- それぞれに基準を満足している

TLD: 評価値のバラつき 最大値/最小値<1.3 JIS Z 4320

評価値の再現性 変動係数<0.075 JIS Z 4320

PGD: 素子間のバラつき 変動係数<0.045 JIS Z 4314

OSL: 評価値のバラつき 最大値/最小値<1.3 JIS Z 4339

評価値の再現性 変動係数<0.075 JIS Z 4339

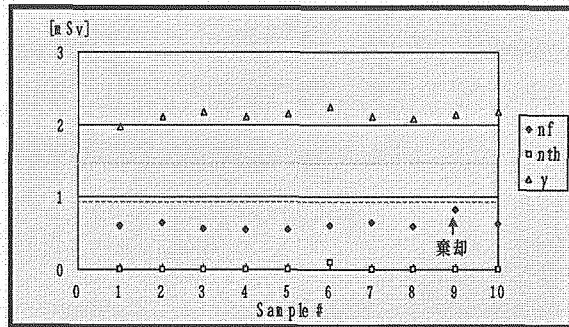
EPD: (JIS Z 4312に関連基準なし)

28Jan/2005 R&D Meeting OEC/JNC

性能調査(2)

- 線量再現性

TLDの素子間の感度のバラつき



γ線測定

最大/最小: 1.14
変動係数: 0.035

速中性子測定

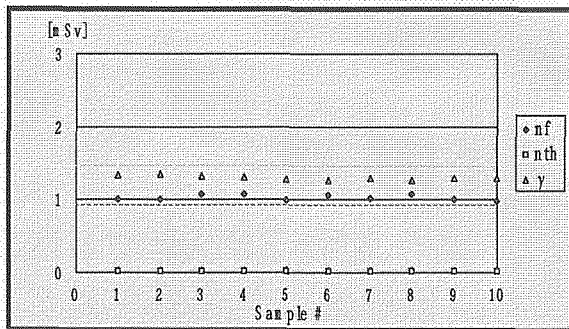
最大/最小: 1.18
変動係数: 0.037

DCA燃料貯蔵庫における試験結果

性能調査(3)

- 線量再現性

EPDの繰返し使用における感度のバラつき



γ線測定

最大/最小: 1.06
変動係数: 0.021

速中性子測定

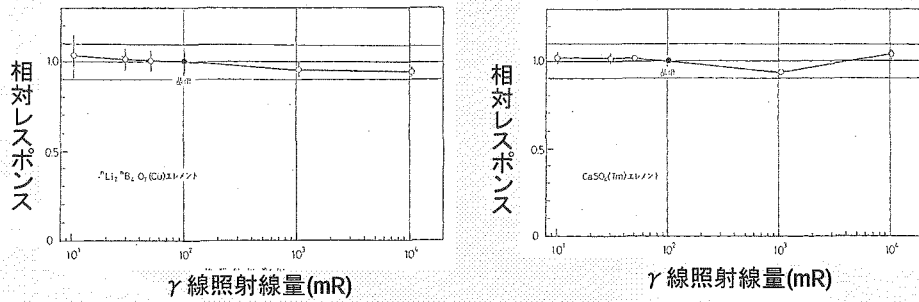
最大/最小: 1.10
変動係数: 0.038

DCA燃料貯蔵庫における試験結果

性能調査(4)

- 線量直線性(TLD) JIS Z 4320:0.1mSvで±0.3、
0.3mSv以上で±0.1 (Co-60 or Cs-137)

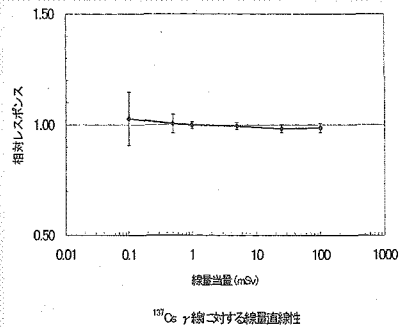
TLD素子の相対レスポンス(Cs-137 γ)



性能調査(5)

- 線量直線性(OSL) JIS Z 4339:0.1mSvで±0.3、
0.3mSv以上で±0.1 (Co-60 or Cs-137)

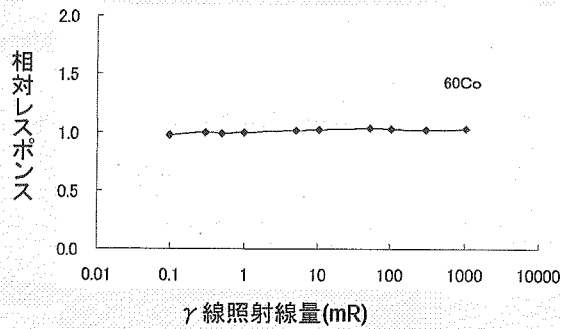
OSLの相対レスポンス(Cs-137 γ)



性能調査(6)

- 線量直線性(PGD) JIS Z 4314:0.1mSvで±0.3、
0.3mSv以上で±0.1 (Co-60 or Cs-137)

PGD素子の相対レスポンス(Co-60 γ)

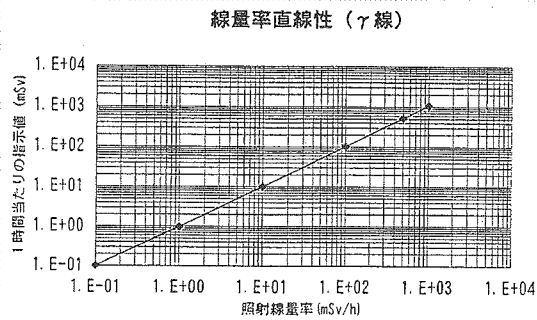


28/Jan/2005 R&D Meeting OEC/JNC

性能調査(7)

- γ 線量率特性(EPD) JIS Z 4312:10mSv/hで±20%

EPDの線量率特性(Cs-137 γ)

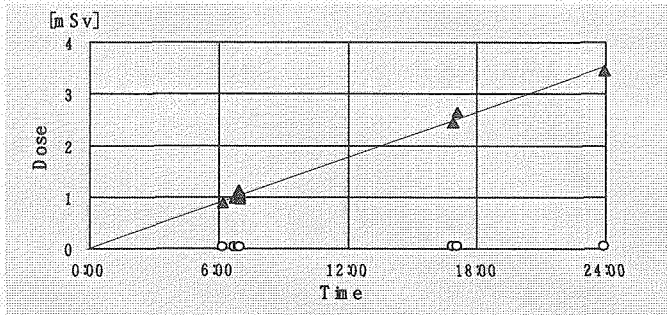


28/Jan/2005 R&D Meeting OEC/JNC

性能調査(8)

- n線量特性(EPD) JIS Z 4312:10mSv/hで±20%

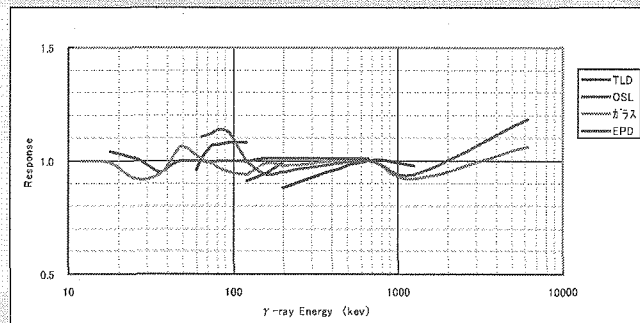
EPDの線量特性(核燃料n)



DCA燃料貯蔵庫における試験結果

性能調査(9)

- γ線エネルギー特性 JIS Z 4320,4312,4314: ±30%



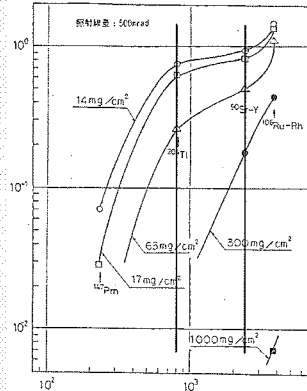
性能調査(10)

- β線エネルギー特性

JIS Z 4320,4312,4314 : Sr-90に対するTl-204の感度比が±30%

TLD $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 素子

各グラフは保護材の厚さによる特性の差を示す。実際の素子の保護材は28mg/cm²とされている。

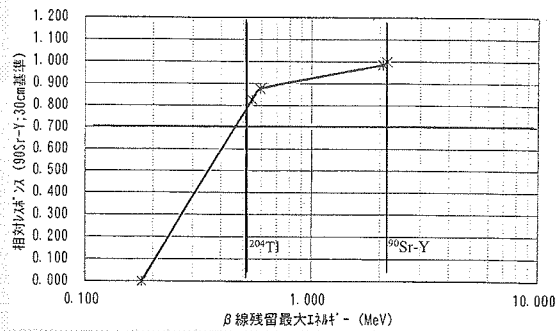


性能調査(11)

- β線エネルギー特性

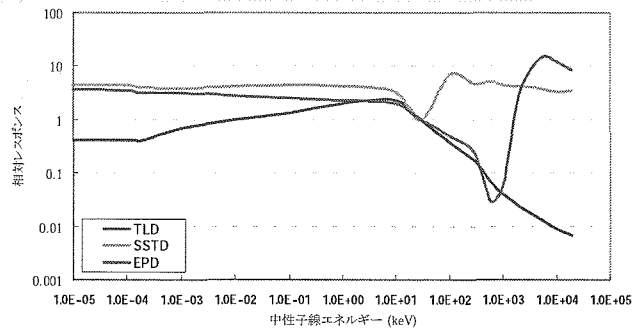
JIS Z 4320,4312,4314 : Sr-90に対するTl-204の感度比が±30%

EPD



性能調査(12)

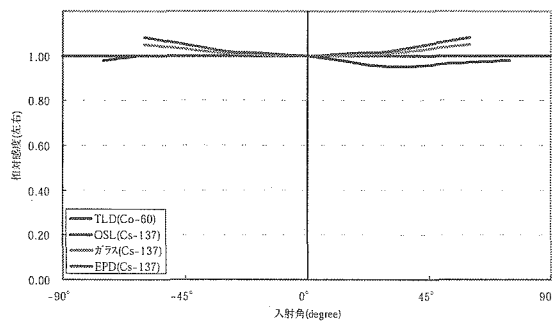
• n線エネルギー特性



28/Jan/2005 R&D Meeting OEC/JNC

性能調査(13)

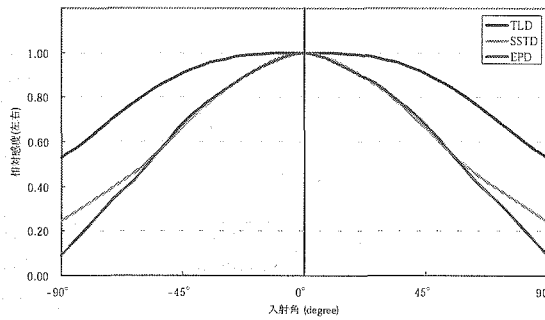
• γ 線方向依存性



28/Jan/2005 R&D Meeting OEC/JNC

性能調査(14)

• n線方向依存性



28/Jan/2005 R&D Meeting OEC/JNC

性能比較(1)

$\beta \cdot \gamma$ 用線量計

線量計	TLD	OSL	GPD	EPD
線量測定範囲の下限値	0.1mSv (JNC 大洗)	0.01mSv	γ : 0.01mSv	γ : 0.01mSv
検出可能なエネルギーの範囲	25keV~10MeV	5keV~10MeV	10keV~10MeV	50keV~10MeV
再測定	再測定不可	再測定可能 (準補正)	再測定可能	再測定不可
利点	<ul style="list-style-type: none"> 測定、再生時間が短い 入射γ線のエネルギーをある程度評価可能 化学的に安定 衝撃に強い 選用在容易 	<ul style="list-style-type: none"> 非常に安価 軽量・小型 衝撃に強い 温湿度の影響が小さい 使い捨てのため、維持管理・校正が不要 	<ul style="list-style-type: none"> 測定精度が高い 広範囲で優れたエネルギー特性 同一ロットで感度ばらつきが小さい フェーディングが小さい 	<ul style="list-style-type: none"> 線量の直読が可能 警報機能あり システム化への対応容易 総被ばくと作業毎及び施設毎被ばく管理の並行可能 作業管理用線量計が省略でき、作業者の負担が軽減
欠点	<ul style="list-style-type: none"> 低エネルギーγ線の感度が低い EPDに次いで高価 フェーディングが大きい 	<ul style="list-style-type: none"> 再生不可 高温環境でフェーディングが発生する 	<ul style="list-style-type: none"> 加熱処理の温度がきわめて高い 湿度の影響による白濁の可能性あり 	<ul style="list-style-type: none"> 低エネルギーγ線の感度が低い 導入経費が高額 重量が重い 衝撃に弱い

28/Jan/2005 R&D Meeting OEC/JNC

性能比較(2)

n用線量計

線量計	TLD (JNC)	SSTD	EPD (半導体2個内蔵型)
線量評価範囲	速中性子線: 0.2mSv~ 熱中性子線: 0.2mSv~	A社製 速中性子線: 0.2~60mSv 熱中性子線: 0.1~60mSv B社製 速中性子線: 0.1~60mSv 熱中性子線: 0.1~2mSv	速中性子線: 0.3mSv~ 熱中性子線: 0.1mSv~
再測定	不可能	可能	不可能
利点	<ul style="list-style-type: none"> 迅速な測定が可能 感度補正の際、中性子線校正場が不要(γ線で代用可能) 運用が容易 [γ線用と同様の管理が可能] 方向依存性が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> 大量処理に適している エネルギー特性が良好 γ線に感度が無い 使い捨てのため、維持管理・校正が不要 	<ul style="list-style-type: none"> 線量の直読が可能 警報機能あり システム化への対応容易 線被ばくと作業毎及び施設毎被ばくの並行管理可能。 作業管理用線量計が省略でき、作業者の負担が軽減。 被ばく管理部署の作業が効率化
欠点	<ul style="list-style-type: none"> 中性子線のエネルギーが高くなる(10keV以上)と、感度が下がる 高線量のγ線場中で、測定誤差が大きい 	<ul style="list-style-type: none"> 読出でエッチングする時間(約3時間)が必要 測定上限の線量が低い フィルタ以外は使い捨て α線に有感 測定時の個人差が大きい 廃液処理設備が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 衝撃に弱い 非常に高価 感度校正の際に、高線量率を照射可能な中性子線校正場が必要 メンテナンスに技術が必要

28/Jan/2005 R&D Meeting OEC/JNC

性能評価(1)

- β ・ γ 線量計について
 - TLD、EPDに、エネルギー特性で課題はあるが、調整可能
 - どのタイプでも大きな問題はない

28/Jan/2005 R&D Meeting OEC/JNC

Investigation on Performance of New Type Dosimeters

性能評価(2)

- n線量計について
 - SSTDが高線量に対応できない→不可
 - TLDとEPDの感度は調整可能
 - TLDとEPDの感度の方向依存性は要注意

28/Jan/2005 R&D Meeting OEC/JNC

Investigation on Performance of New Type Dosimeters

導入経費

◎ : 導入経費は基準の約半分
 ○ : 基準金額
 △ : 導入経費は基準の約1.5倍
 ▲ : 導入経費は基準の2倍から3倍
 × : 導入経費は基準の4倍以上

導入案	大洗工学センターのみ導入	原研大洗を含む場合
①現行型 TLD バッジを継続使用する場合。	-	◎
②現行型 TLD を全数新型 TLD に更新する場合。	○	○
③OSL 線量計を導入し、中性子線の測定は現行型 TLD を使用する場合。(OSL 線量計を 10 年間使用)	◎	◎
④ガラス線量計を導入し、中性子線の測定を固体飛跡検出器の測定サービスで行う場合。 (中性子線の測定サービスは、10 年間利用)	△	○
⑤ガラス線量計を導入し、中性子線の測定を固体飛跡検出器で行い、自主運用する場合。 (固体飛跡検出器は、10 年間購入)	△	○
⑥EPD を導入し、全ての施設でβ・γ・n 線を測定可能な最新型を導入する場合。	×	-
⑦EPD を導入し、β・γ・n 線を測定可能な最新型を「常陽」、DCA、FMF のみに導入し、その他の施設は、現在「常陽」で使用中の APD を流用する場合。	▲	-

28/Jan/2005 R&D Meeting OEC/JNC

管理に要する技術能力

外部機関による測定サービスは使わないことが前提

- 新型TLD: 現状と同様
- OSL: 使い捨てで、特殊な技術不要
- PGD: 測定、再生の技術習得必要
- EPD: 現状と同様、個数増加
- SSTD: 測定技術習得必要

現行の被ばく管理システムへの適応性

項目 更新 線量計	線量評価	入出力	運用	備考
新型 TLD	換算係数の変更必要 (測定装置対応可能)	検出限界線量の 変更必要	変更不要	改造は少ない
OSL	素子毎の換算係数の 割り付け必要	検出限界線量の 変更必要	使い捨て運用 に変更必要	線量評価システム の再構築必要
PGD	評価式及び換算係数 変更必要 (測定装置では対応 不可能)	検出限界線量の 変更必要 入力データ追加	改造は少ない	線量評価システム の再構築必要
SSTD	素子毎の換算係数の 割り付け必要	入力データ追加	使い捨て運用 に変更必要	線量評価システム の再構築必要
EPD	線量評価機能不要	入力自動化 出力の集計、整理 機能構築必要	自動化	新規システムの 導入が合理的

大洗における個人線量計の必要条件(再掲)

- 携帯性
- 大量使用(1000台以上の同時使用、年間のべ3000件~5000件程度測定、迅速な評価)
- 0.1mSv以上の感度(現行管理と同等)
- 均一な感度特性(繰返し使用、ロット毎)
- 安定した感度特性(長期間、使用条件)
- 施設によって異なる管理対象線種やエネルギー範囲に対応
- 利便性(期間毎管理、作業毎管理)

28/Jan/2005 R&D Meeting OEC/JNC

総合評価(1)

- 新型TLD
 - 感度は向上
 - ×管理の合理化はされない
- OSL線量計
 - 感度良好 ○管理の合理化も可能
 - 経費安価
 - ×中性子不感

28/Jan/2005 R&D Meeting OEC/JNC

総合評価(2)

- ガラス線量計(PGD)
 - 感度は大幅に向上
 - ×経費高価 ×管理の合理化はされない
 - ×中性子不感
- 固体飛跡検出器(SSTD)
 - 経費安価
 - × β 線・ γ 線不感 ×感度の方向依存性大
 - ×管理の合理化はされない

総合評価(3)

- EPD
 - 管理の合理化、高度化可能
 - 警報機能あり
 - ×経費高価 ×感度の方向依存性大

まとめ

- 実用化されている個人線量計の性能については大きな問題は無い。
- 新型TLD、PGD、SSTDについては、現行のTLDに代えて導入することの、有意なメリットはない。OSLは経費削減が期待できる。
- EPDについては、導入経費が高価であるものの、管理の大幅な合理化、高度化が期待できる。次世代個人線量計として、推薦できる。

Geダストモニタの性能評価

安全管理部安全対策課
細谷 梨沙

発表概要

- ダストモニタの改良の目的
- 装置の概要
- 各部の特徴
(集塵部、制御部、測定部、解析部)
- 性能評価
- 観測された事象

環境放射線モニタリングの目的

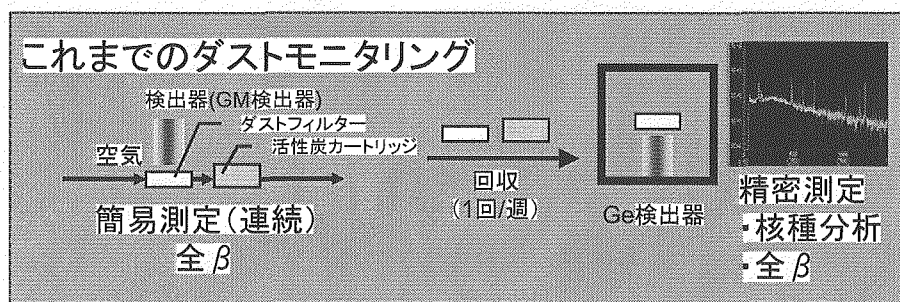
- 通常時の放射線レベルの把握
- 予期しない放射性物質の放出による周辺環境への影響の評価

ダストモニタリング

大気中のダスト(大気塵埃)を収集・分析

→ 最も直接的に放出の影響が現れる
試料の1つ

ダストモニタの問題点



〈問題点〉

緊急時の対応

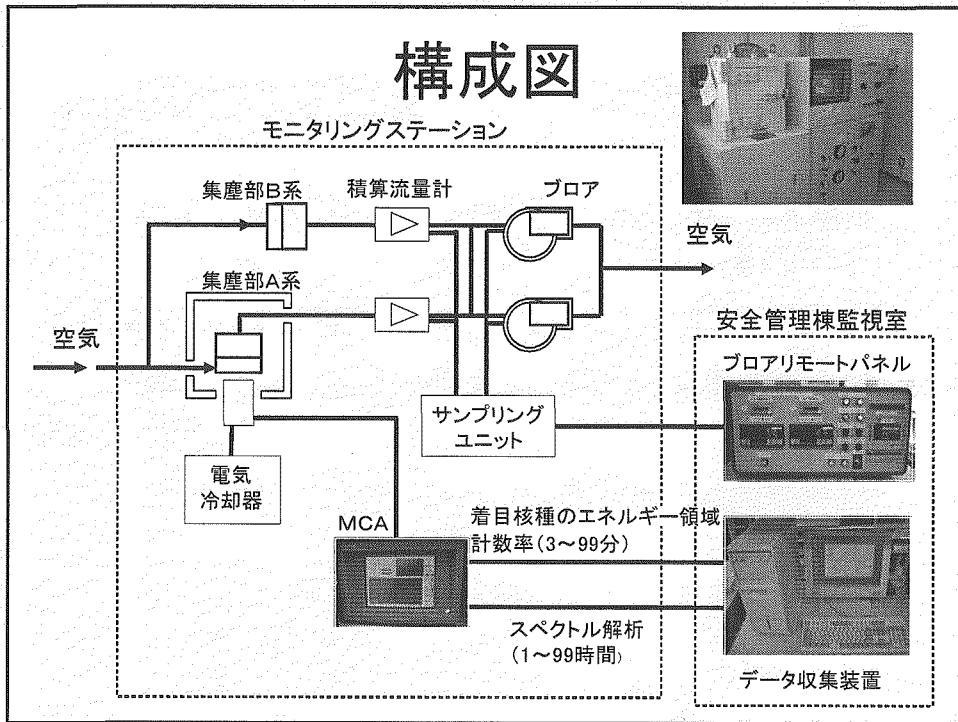
- フィルターを回収して精密測定するまで微量放射性物質の検出が難しい
- 核種の同定はできない
- 緊急時サンプリングと通常サンプリングが両立できない

ダストモニタの改良の目的

- 事故起因の放射性核種を迅速に検出し、環境への影響を早期に把握する。
- 緊急時モニタリングにも対応できる野外ダストモニタの開発

モニタリングステーションの概要





ダストモニタの特徴(集塵部)

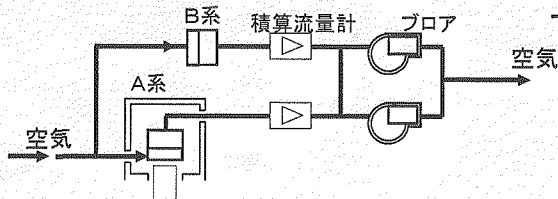
- フィルタ(ダスト) + 活性炭カートリッジ(ヨウ素)
- 集塵部: 2系統(単独でフィルター交換可能)
 - A系: 集塵機能 + 放射線測定(継続測定)
 - B系: 集塵機能のみ(緊急時)
- ブロア: 2系統

1台のブロアで2系統の集塵

故障の際はもう1台のブロアが自動起動

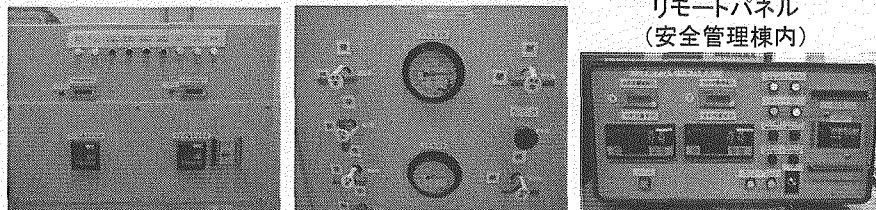


→ 集塵を継続



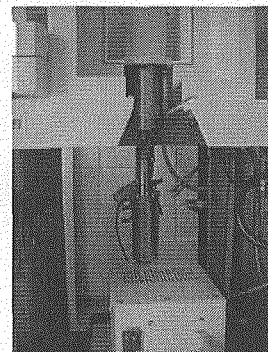
ダストモニタの特徴(制御部)

- 流量率 100L/min(一定)
- 吸引圧力の変動 10~60cmHg
→ 範囲外 警報発報・自動停止
- 流量率、積算流量、吸引圧力、警報情報
→ 安全管理棟内でも監視可能



ダストモニタの特徴(測定部)

- 検出器: Ge半導体検出器(電気冷却式)
→ 核種の同定が可能, メンテナンスが容易
- ダストフィルタ+活性炭カートリッジ
→ ダストとヨウ素を測定
- MCAはモニタリングステーション内
データは安全管理棟に送信・解析
- フィルタ+カートリッジ1回/週 回収
→ Ge半導体検出器で精密測定



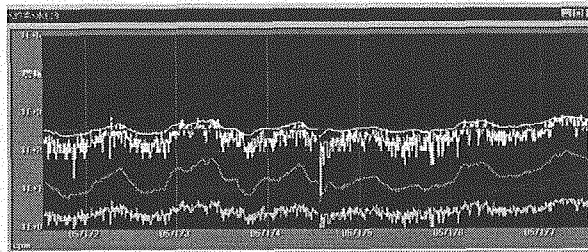
ダストモニタの特徴(解析部)

2系統の解析が可能

1.短時間測定系

- 測定時間:3~99分で任意設定(10分に設定)
- 着目核種のエネルギー領域の計数率を測定
(Cs-137,I-131,50keV以上)
- 大量放出による高濃度の着目核種の迅速な検出

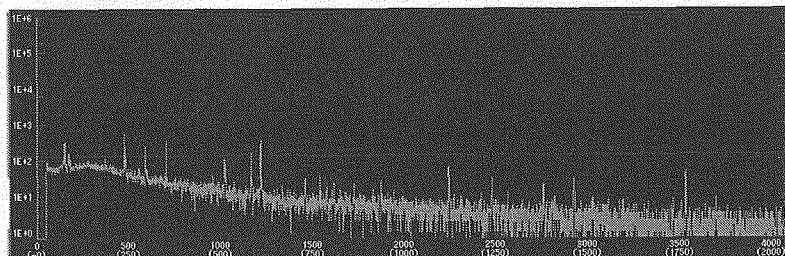
ダストトレンドグラフ
(10分値 6日分)



ダストモニタの特徴(解析部)

2.長時間測定系

- 測定時間:1~99時間で任意設定(3時間に設定)
- スペクトル解析(核種同定及び放射能の算出)
- 微量放出による低濃度の放射性核種の早期の検出



γ線スペクトル

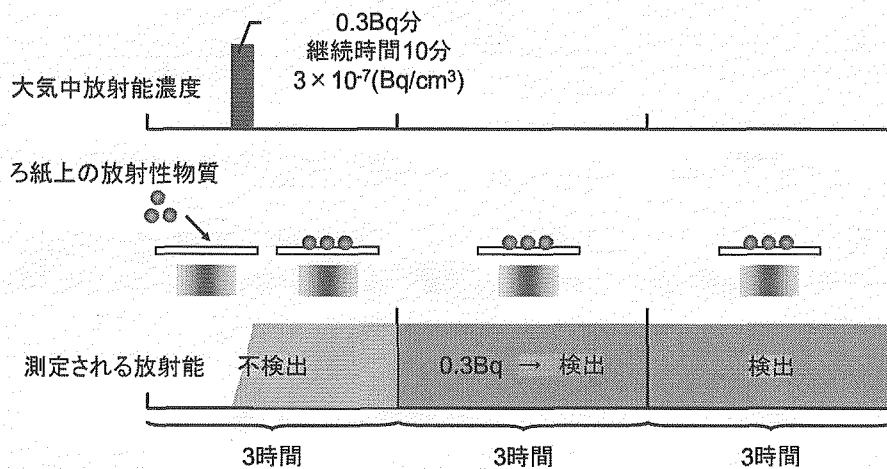
長時間測定系 検出下限①

核種	半減期	γ線エネルギー (keV)	検出下限 (Bq)
Rb-88	15.2m	1836	1.5
Rb-89	2.58h	1032	0.5
I-131	8.04d	364	0.3
I-133	20.9h	530	0.3
I-135	6.61h	1260	1.2
Cs-134	2.06y	605	0.3
Cs-137	30.1y	662	0.3
Cs-138	32.2m	1010	1.0

検出下限: H16.12.27~H17.1.4の3時間測定 of 検出下限の最大値

長時間測定系 検出下限②

Cs-137の場合 検出下限値 0.3Bq

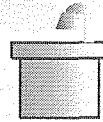


長時間測定系 検出下限③

〈検出下限値〉

I-131 0.3Bq

Cs-137 0.3Bq



⇒ 放出継続時間10分 $3 \times 10^{-7}(\text{Bq}/\text{cm}^3)$
 1時間 $5 \times 10^{-8}(\text{Bq}/\text{cm}^3)$

(参考)告示20号 排気中又は空気中の濃度限度

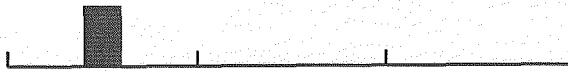
I-131 $5 \times 10^{-6}(\text{Bq}/\text{cm}^3)$

Cs-137 $3 \times 10^{-5}(\text{Bq}/\text{cm}^3)$ → 十分な感度

事故時を想定する (長寿命核種の場合)



大気中放射能濃度



短時間測定系

→ 放出継続時間と
濃度変化がわかる



長時間測定系

→ 積算放射能がわかる

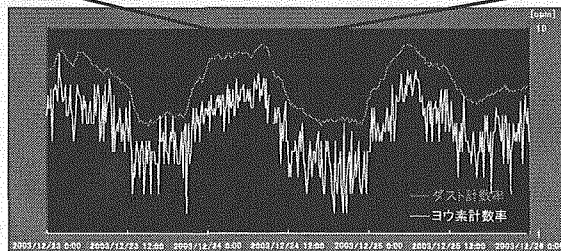


→ より詳細な線量評価が可能

ガンマ線スペクトル

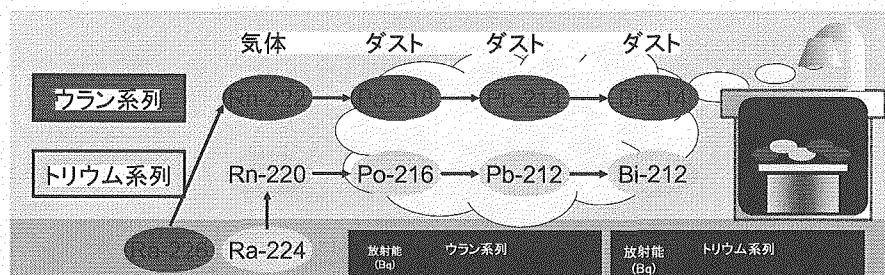


- ▼ トリウム系列
212Pb→212Bi
- ▼ ウラン系列
214Pb→214Bi

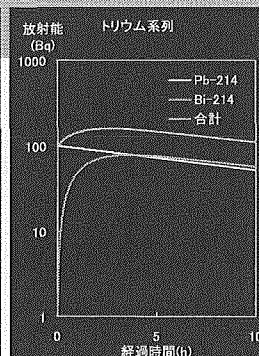
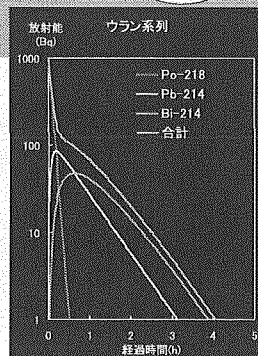
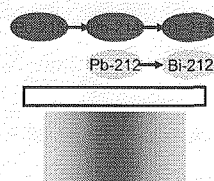


短時間測定系
ダスト計数率の
トレンドグラフ
(3日分)

天然放射性核種による ダスト濃度の変化について



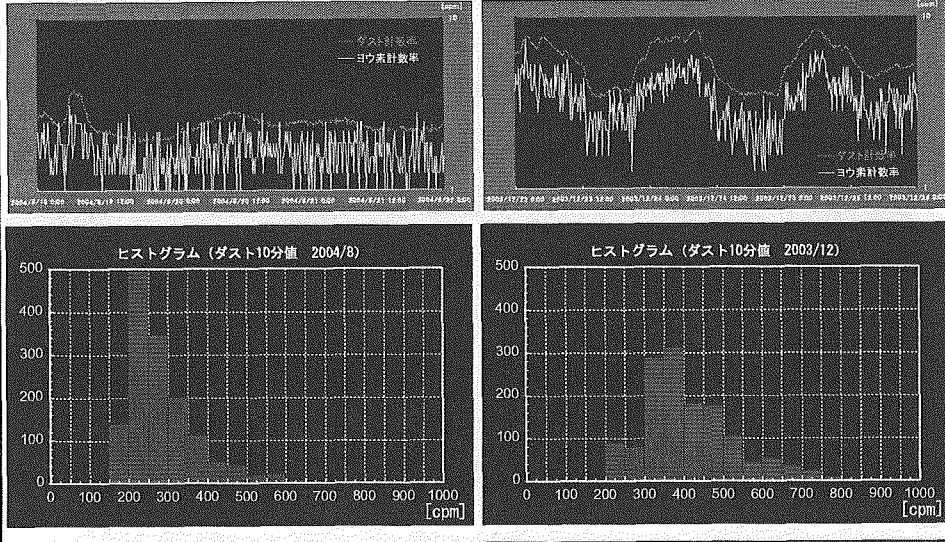
ろ紙上でも壊変する



ダスト濃度の変化

夏(8月)

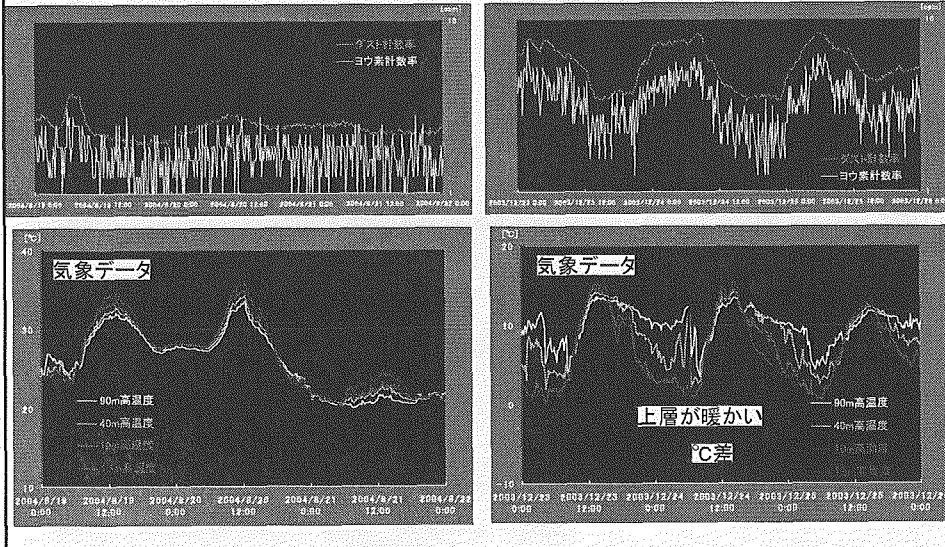
冬(12月)



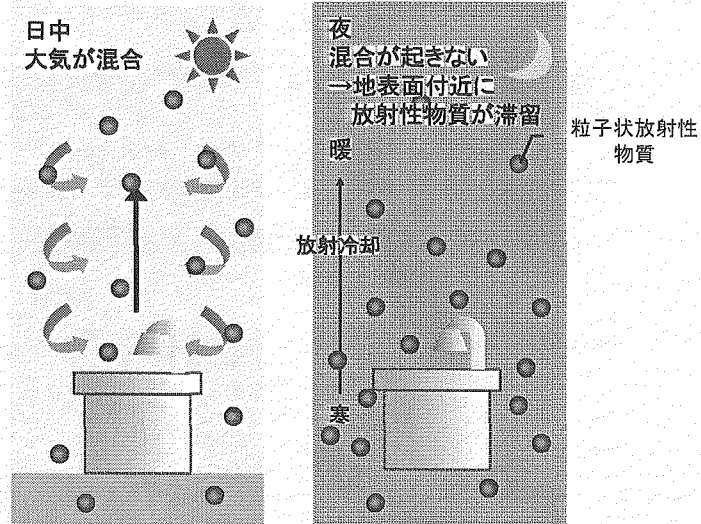
ダスト濃度と気象

夏(8月)

冬(12月)

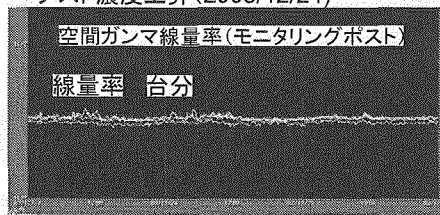


ダスト濃度上昇の理由

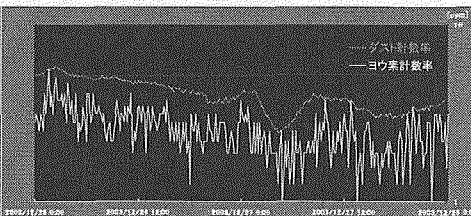
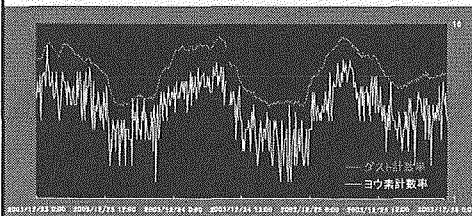
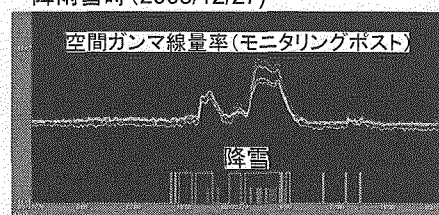


ダスト濃度と線量率

ダスト濃度上昇 (2003/12/24)

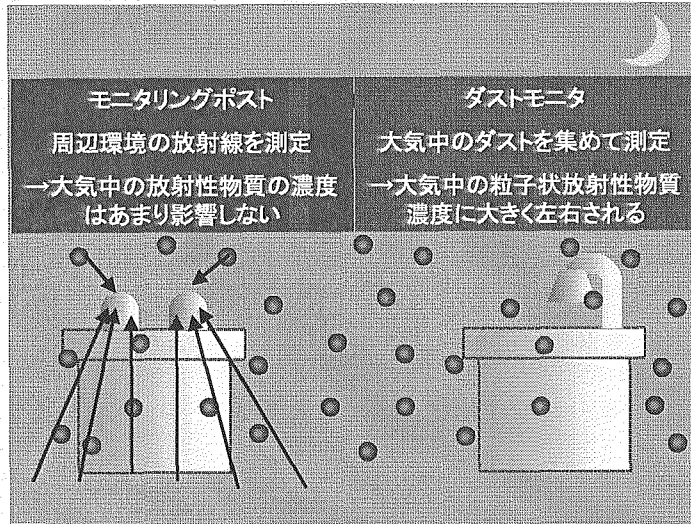


降雪時 (2003/12/27)

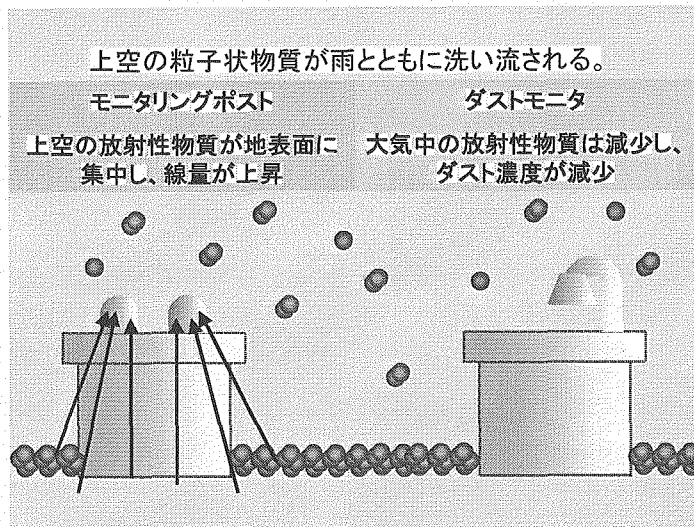


空間ガンマ線量率とダスト濃度の変動は異なる

ダスト濃度上昇時



降雨雪時



まとめ

- Ge半導体検出器を用いたダストモニターを開発した
- 微量放射性核種の迅速な検出が可能になった
- I-131, Cs-137の検出下限値は0.3Bq(3時間測定)
 $3 \times 10^{-7}(\text{Bq}/\text{cm}^3)$ (10分間継続の場合)
 - 濃度限度の I-131: 6/100
Cs-137: 1/100
- 十分に空気濃度限度を担保
- 今後、天然放射性核種の挙動について調査予定

事故時の希ガス放出量評価

平成17年1月
安全管理部 放射線管理課
薄井 利英

報告内容

- 背景
- 課題
- 目的・課題の改善
- まとめ

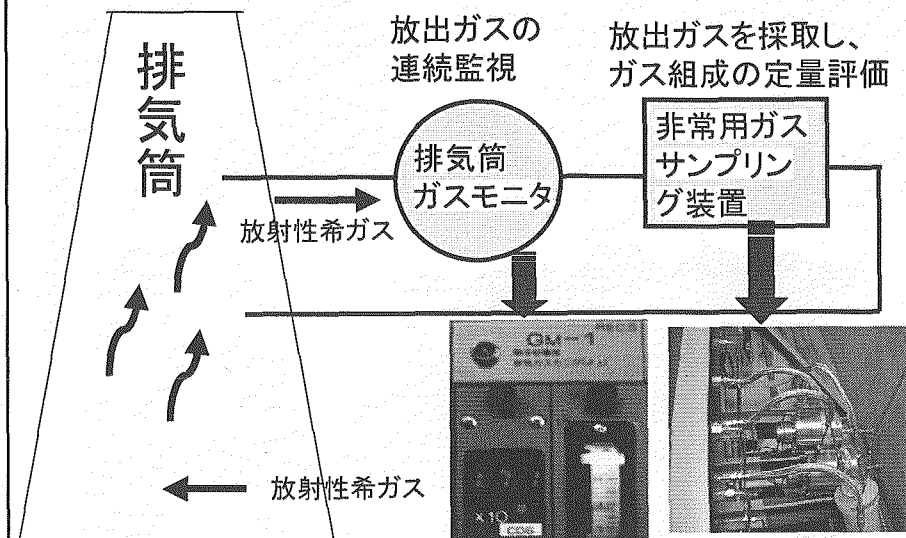
背景

燃料破損等の事故が生じた場合、施設周辺への影響評価には、排気筒から環境中へ放出される放射性希ガスの種類・量の評価が必要



従来は、事故時に放出が想定される放射性希ガスの放出量評価に課題がある

従来の評価方法



課題(1)

・ガス組成の定量評価

➡ 非常用ガスサンプリング装置にてガスを採取し、Ge-PHAで核種分析

・従来のガス採取容器(SUS製容器)は、容器の遮蔽により、低エネルギーガンマ線に対し感度が低い

・検出効率の補正が不十分

放射性希ガスに対し、十分な濃度評価が出来ているのか？

課題(2)

・ガスモニタで放出ガスの連続監視

➡ 核種毎の評価を行うには放出可能性のある核種の換算定数(Bq/cm³/cps)が必要

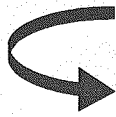
※実ガス校正を実施した⁴¹Ar, ⁸⁵Kr, ¹³³Xeについては、換算定数が設定

上記の3核種以外が放出された場合の評価は？

課題(1)の改善

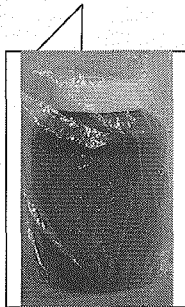
目的

- ・低エネルギーガンマ線に対する感度の向上
- ・検出効率の向上



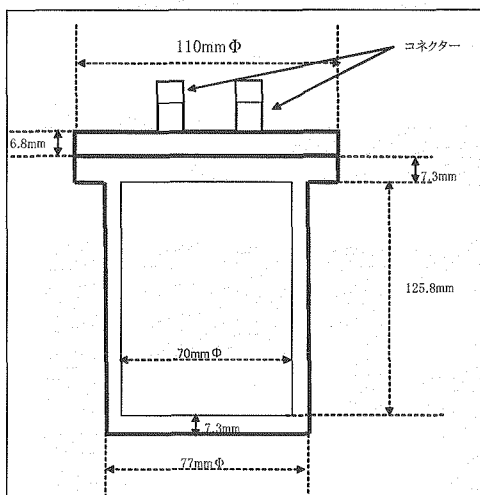
新しいサンプリング容器の開発

校正用線源で校正できるように形状・材質を合わせる

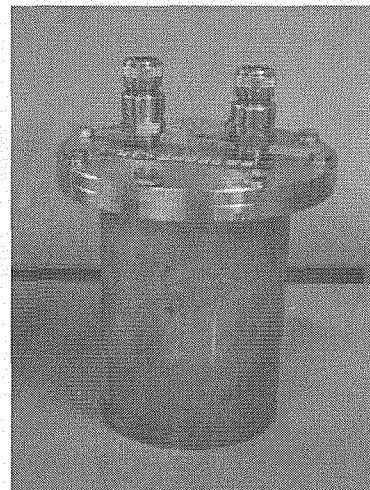


- ①材質
SUS製 → ポリプロピレン製
- ②容器の形状
半径・高さ・底厚・体積を同様の形状

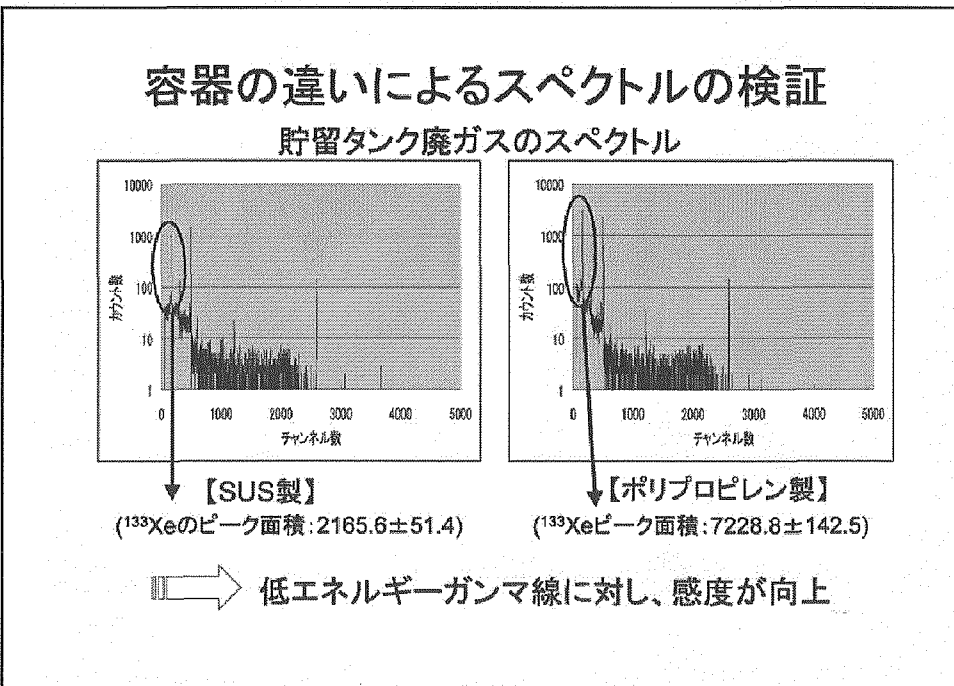
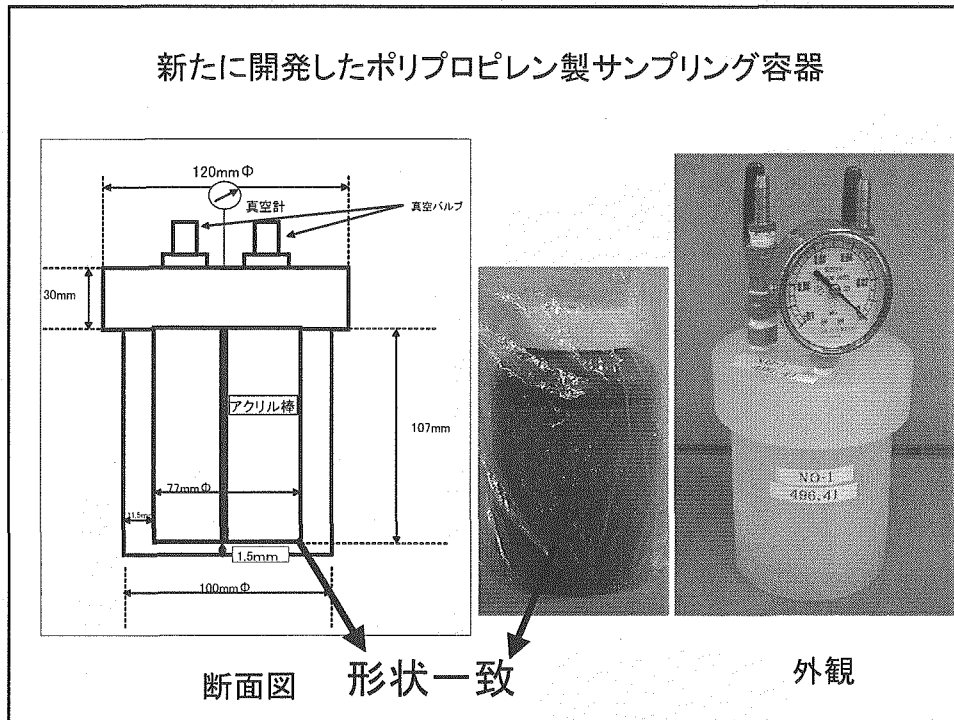
従来のSUS製サンプリング容器



断面図



外観



●校正用線源で校正した検出効率を新サンプリング容器で利用できるかを検証

- ・空気試料を対象とした校正用線源は存在しない

➡ 500mℓ 水溶液試料を校正対象とした校正用線源を使って検出効率を与えなければならない



空気試料に検出効率が適用可能か？



計算コードEGS-4にて検証

計算コードEGS-4の解析条件

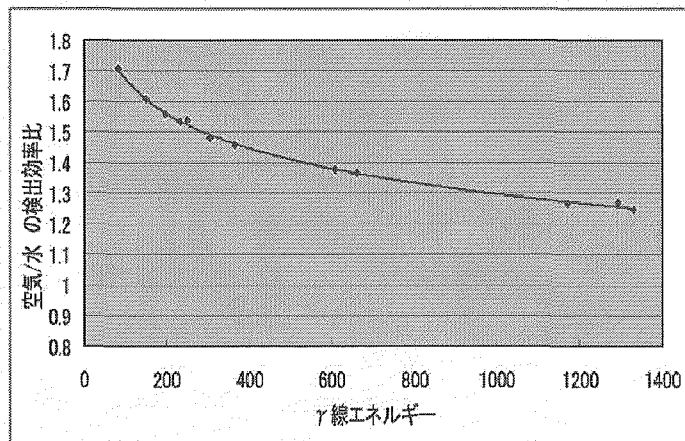
- サンプリング容器内に、想定される核種が一様に存在すると仮定
- 想定核種
 - ・これまでに放出ガス測定で検出された経緯のある核種
 - ・測定能力を備えておくべき核種
 - ・校正能力の指標となるガンマ線放出核種として代表的な核種
- 測定器にはゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線核種分析装置を想定

表-1. サンプルング容器の感度比較計算結果

想定核種	評価対象 エネルギー (keV)	ROIの半値幅 (region of interest) (keV)	計算コードEGS-4による計算結果		
			有効面積内のカウント値		カウント値の比
			水溶液試料	空気試料	空気/水溶液
^{133}Xe	81	1.24	2.04E-01	3.49E-01	1.71
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	151	1.29	4.30E-01	6.92E-01	1.61
^{88}Kr	196	1.32	1.55E-01	2.41E-01	1.56
$^{133\text{m}}\text{Xe}$	233	1.35	6.06E-02	9.31E-02	1.54
^{135}Xe	250	1.36	5.49E-01	8.43E-01	1.54
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	305	1.39	8.83E-02	1.31E-01	1.48
^{131}I	364	1.43	5.27E-01	7.67E-01	1.46
^{135}Xe	608	1.60	2.01E-02	2.77E-02	1.38
^{137}Cs	662	1.63	5.97E-01	8.17E-01	1.37
^{60}Co	1173	1.96	7.59E-01	9.59E-01	1.26
^{41}Ar	1294	2.04	7.59E-01	9.64E-01	1.27
^{60}Co	1332	2.07	7.70E-01	9.60E-01	1.25

計算結果: 1Bq/cm³の濃度で規格化し、単位時間当たりの計数で評価しているため、カウント値の比は、検出効率比となる

ガンマ線エネルギーの違いによる補正曲線



検証結果

・500ml水溶液試料用の校正用線源で校正した検出効率を、空気試料に適用する場合

遮蔽効果:水溶液 > 空気

➡ 検出効率が低下、濃度は、過大評価

$$\text{濃度} = \frac{\text{正味計数率}}{\text{検出効率}} \div \text{核種のガンマ線放出率} \div \text{測定時間} \div \text{容積}$$

↓
補正曲線を用いて検出効率を補正

・例) F4B試験で採取した放射性希ガス

核種	Ge-PHAによる核種分析 (濃度補正前)	空気/水の比 (検出効率の比)	濃度補正後
^{133}Xe	7.52 Bq/cm ³	1.71	4.40 Bq/cm ³

放射性ガス濃度評価に実績のある振動容量電位計の結果

(電離電流値から濃度を求める手法)

^{133}Xe 濃度: 4.6 Bq/cm³

➡ 補正值は適正である

課題(1)の結果

- (1)放射性希ガスの低エネルギーガンマ線にも十分な感度を有する容器となった
- (2) 検出効率の補正により、精度の高いガス組成情報が得られた

課題(2)の改善

目的

・既存のガスモニタ(GM-1)で核種ごとの放出量評価を実施するため放出の可能性のある核種に換算定数(Bq/cm³/cps)を与える

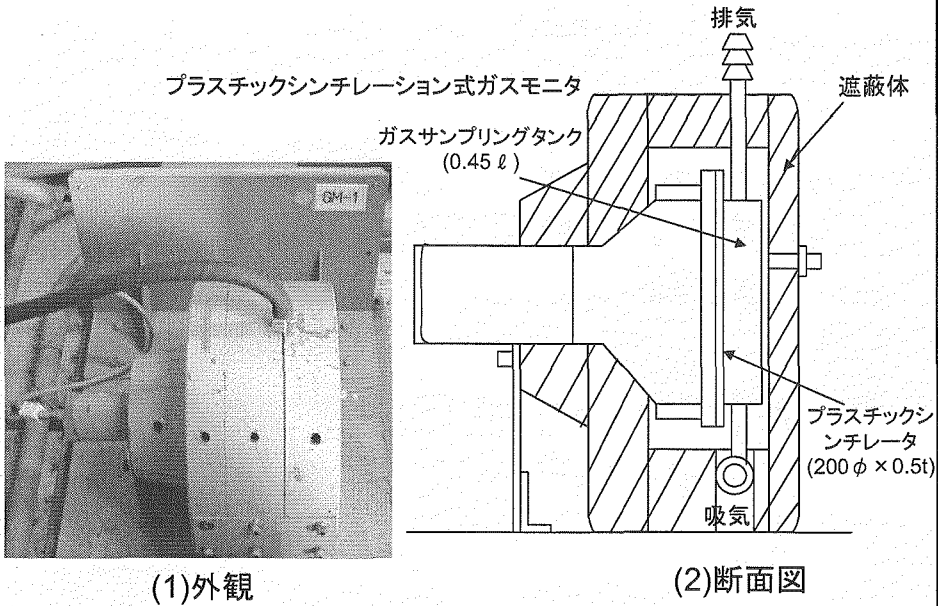
①放出核種の調査

事故が生じた場合、放出が想定される核種の調査

(参考文献: 大洗工学センター原子炉設置変更許可申請書)

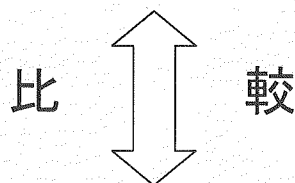
	核種
希ガス	⁸⁷ Kr, ⁸⁵ Kr, ⁸⁸ Kr, ⁸⁵ mKr, ¹³⁵ Xe, ^{133m} Xe, ¹³³ Xe, ^{131m} Xe, ⁴¹ Ar
ヨウ素	¹³¹ I, ¹³³ I

② ガスモニタ(GM-1)についての形状・容積の調査



③ 計算コードの妥当性評価

想定核種、既存ガスモニタの形状・容積を模擬し計算コードEGS4を用いてシミュレーション解析を行い、核種ごとの換算定数を計算



実ガス校正により換算定数が設定された核種(^{85}Kr , ^{133}Xe , ^{41}Ar)

換算定数の計算結果

	核種	計算コード (EGS-4)	実ガス校正値	計算値/校正値
		換算定数(Bq/cm ³ /cps)		
希 ガ ス	⁸⁵ Kr	5.47×10^{-3}	6.06×10^{-3}	0.90
	¹³³ Xe	1.06×10^{-2}	1.19×10^{-2}	0.89
	⁴¹ Ar	4.53×10^{-3}	5.05×10^{-3}	0.90

⁸⁵Kr, ¹³³Xe, ⁴¹Arの3核種について
計算コードEGS-4と実ガス校正値との比較結果

→ 相対誤差10%程度の一致

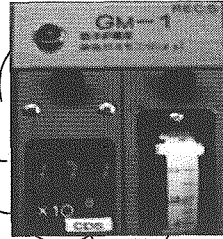
↪ 計算コードEGS-4で求めた換算定数値は、
信頼性を有する

事故時に放出が想定される核種の換算定数

	核種	計算コード(EGS-4)	実ガス校正値
		換算定数(Bq/cm ³ /cps)	
希ガス	⁸⁷ Kr	4.41×10^{-3}	/
	⁸⁵ Kr	5.47×10^{-3}	6.06×10^{-3}
	⁸⁸ Kr	5.84×10^{-3}	/
	^{85m} Kr	5.63×10^{-3}	/
	¹³⁵ Xe	4.86×10^{-3}	/
	^{133m} Xe	4.99×10^{-3}	/
	¹³³ Xe	1.06×10^{-2}	1.19×10^{-2}
	^{131m} Xe	5.34×10^{-3}	/
	⁴¹ Ar	4.53×10^{-3}	5.05×10^{-3}
ヨウ素	¹³¹ I	6.34×10^{-3}	/
	¹³³ I	4.86×10^{-3}	/

実際上のガスモニタでは

指示値は、計数率 cps。



・一核種のみ放出の場合の濃度算出法

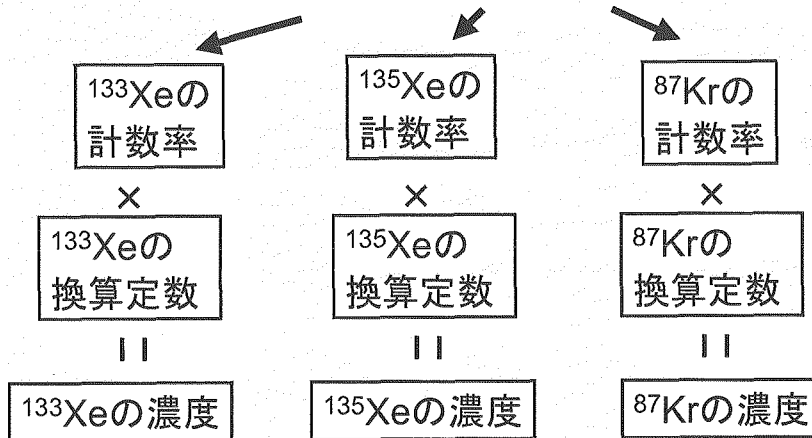
モニタの計数率 cps (B.G.は差し引く)に放出核種の換算定数(Bq/cm³/cps)を乗じることで濃度(Bq/cm³)が求まる

⇒ 濃度(Bq/cm³)の連続監視

・核種が混在して放出される場合の濃度算出法

例) ¹³³Xe, ¹³⁵Xe, ⁸⁷Kr の核種が混在して放出

ガスモニタの計数率 cps



モニタの計数率から核種ごとの計数率へ

$$\text{核種ごとの計数率} = \text{ガスモニタの計数率} \times \frac{\text{核種の計数率割合}(\%)}$$

核種の計数率割合(%)

非常用ガスサンプリング装置で採取・評価した、ガス濃度組成で決定

演算例

※非常用サンプリング装置で採取し評価した、ガス濃度を仮定

	核種	放射能濃度 (Bq/cm ³)	換算定数 (Bq/cm ³ /cps)	計数率 (cps)	核種の 計数率割合 (%)
希ガス	⁸⁷ Kr	3	4.41×10^{-3}	6.80×10^2	11.6
	¹³⁵ Xe	7	4.86×10^{-3}	1.44×10^3	24.4
	¹³³ Xe	40	1.06×10^{-2}	3.77×10^3	64.0
合計				5.89×10^3	

サンプリングした
時点でのモニタ
の計数率

モニタ表示: $5.89 \times 10^3 \rightarrow 1.00 \times 10^4$ cpsに変動

$$\begin{aligned} \text{{}^{87}\text{Krの計数率}} &= 1.00 \times 10^4(\text{cps}) \times 0.116(\%) \\ &= 1.16 \times 10^3(\text{cps}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{{}^{87}\text{Krの放射能濃度}} &= 1.16 \times 10^3(\text{cps}) \times 4.41 \times 10^{-3}(\text{Bq/cm}^3/\text{cps}) \\ &= 5.11(\text{Bq/cm}^3) \end{aligned}$$

・モニタ指示値からの濃度算出法 (核種が混在)

サンプリング装置で採取したガス濃度(Bq/cm^3)
から核種の計数率割合(%)を算出



モニタの計数率(cps)に核種の計数率割合(%)を
掛け、核種ごとの計数率(cps)を算出

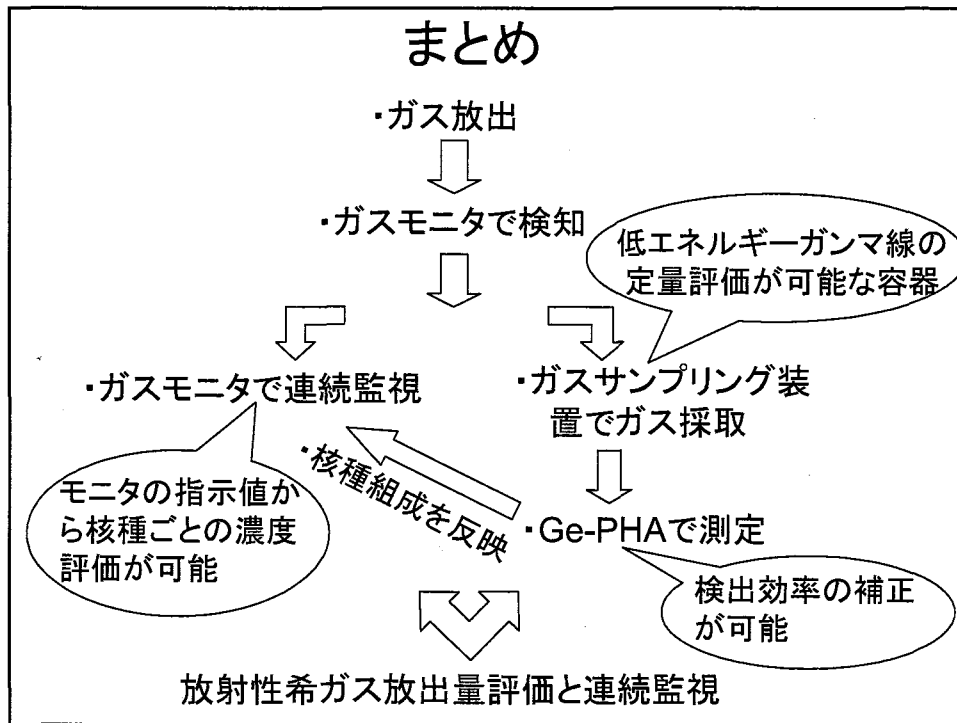


核種ごとの計数率(cps)に換算定数($\text{Bq}/\text{cm}^3/\text{cps}$)
を掛けて核種ごとの濃度(Bq/cm^3)となる

➡ 核種ごとの濃度(Bq/cm^3)の連続監視

課題(2)の結果

- (1) 主な放出核種を想定し、換算定数を解析した結果、相対誤差が実ガス校正値と10%程度の一致を示し、妥当性が確認できた
- (2) 異常時の際、放出が予想される核種ごとの換算定数が得られたことで、実ガス校正を実施した核種以外の核種も濃度評価が可能となった



- ### まとめ
1. サンプルング容器の開発により、低エネルギーガンマ線の測定が可能となった。また、検出効率の補正值の適用により、放出ガス組成の定量評価が可能となった
 2. 放出が想定される核種の換算定数を定めたことで、モニタの指示値から放出が想定される全ての核種の濃度評価が可能となった

第7回 R&D報告会

[平成17年2月18日]

燃料製造システムにおけるMA含有燃料の 発熱影響検討

平成17年2月18日

システム技術開発部
燃料製造システムGr.
小池 和宏

— 新燃料の発熱 —

- MA(Cm244)の寄与が大きい
- MAを回収する使用済燃料の種類(LWR、A-LWR、Puサーマル、FBR)、
燃焼度、冷却期間によって、発熱量は大きく異なる
(極端なケースまで考慮すると500~2500W/体程度の幅がある)

MOX新燃料1体の発熱量の例

核種	単位 発熱量 (W/kg)	高速炉平衡期			高速炉導入期(注)			
		重量 (kg)	発熱量 (W)	発熱 割合	重量 (kg)	発熱量 (W)	発熱 割合	
U小計	—	59.7	5.2E-04	0.0%	57.1	5.0E-04	0.0%	
Pu小計	—	19.3	200	24.5%	20.3	520	29.8%	
MA小計	—	0.9	620	75.5%	2.4	1200	70.2%	
発熱寄 与核種	Am241	1.14E+02	0.4	46	5.6%	1.1	120	6.9%
	Cm244	2.83E+03	0.2	570	69.7%	0.4	1100	63.0%
合計	—	79.8	820	100%	79.8	1800	100%	
重量当りの発熱量(W/kgHM)		10.3			22.6			

注: 軽水炉使用済燃料(4年冷却Puサーマル燃料)から回収したMAを添加

一 温度制限の考え方

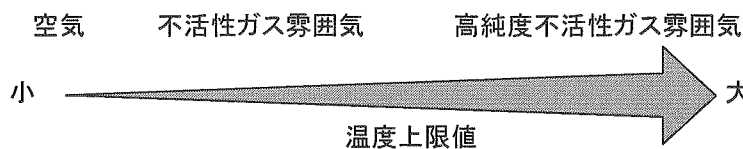
● 発熱量上限値の設定

- ・ 温度依存の影響を評価
 - ・ 温度制限の設定
- ⇒ 温度上限に相当する発熱量を
発熱量上限値とする

● 温度上限値

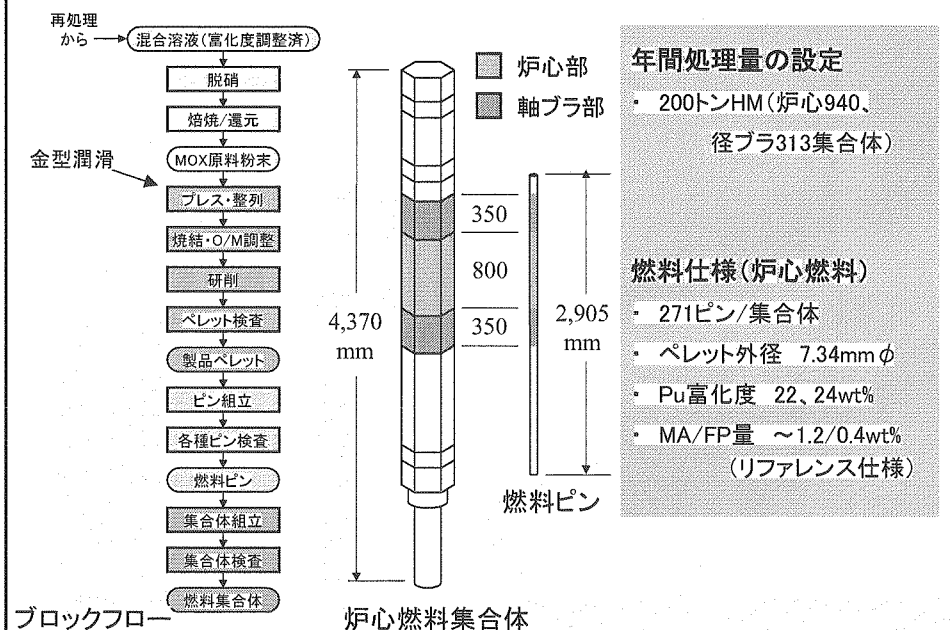
- ・ 必ずしも製造上の限界を示す訳ではない(前提条件に依存)

(例) 核燃料物質・部材の酸化温度を温度制限



前提条件: コストインパクト小 + 保守補修性の維持
(大規模な設備改造 又は 複雑な構造は不可)
として温度制限値を設定

簡素化ペレット法の概略と検討条件



— 製造への影響 —

○ 想定される影響 (製造設備)

対象設備	事象	暫定制限温度	雰囲気
プレス (ホツパ)	粉末が再酸化し、ペレットの品質が劣化 (低密度化等)	100℃	空気
		200℃	不活性ガス (注)
O/M調整炉 ~ 研削装置	ペレットが再酸化し、品質が劣化 (O/M比の増加)	同上	同上
集集体組立装置	被覆管が酸化し、品質が劣化	300℃	空気
	燃料バンドルが熱膨張し、ラップ管が挿入できない	270℃	雰囲気依存しない

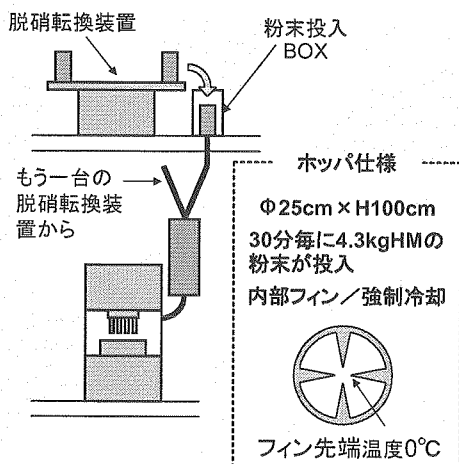
(注) 不純物として存在する酸素により、酸化される

○ 想定される影響 (検査・貯蔵設備)

- ・ 熱膨張による寸法・密度の変動 → 検査精度
- ・ 貯蔵庫内での多量の発熱 → 除熱 (空調) 設備の負荷

— ホツパの温度評価(1) —

● プレス (ホツパ) の概要

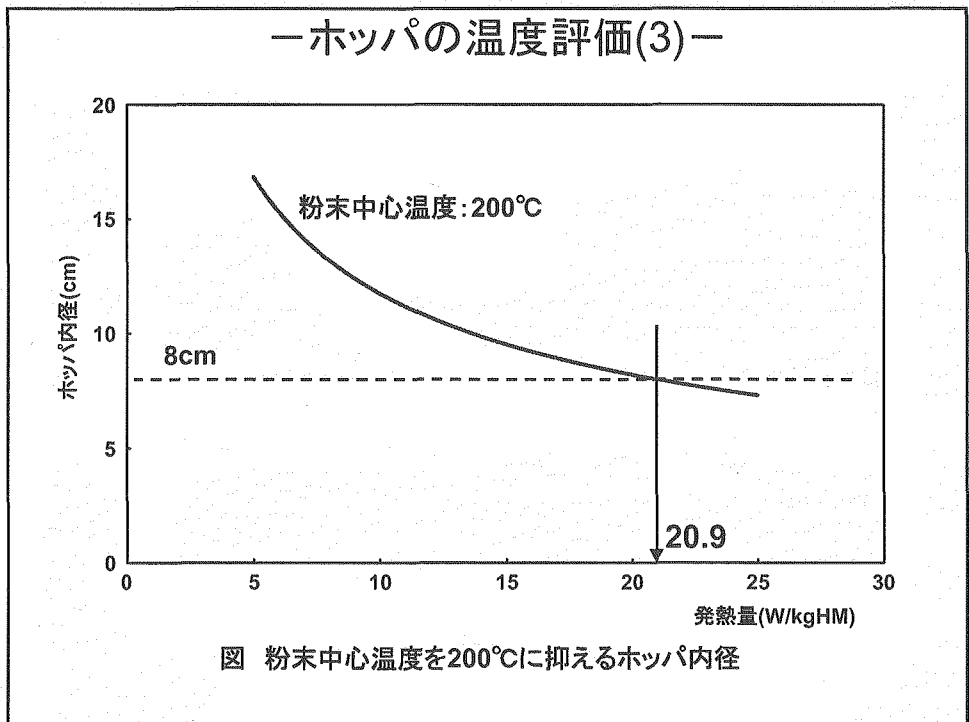
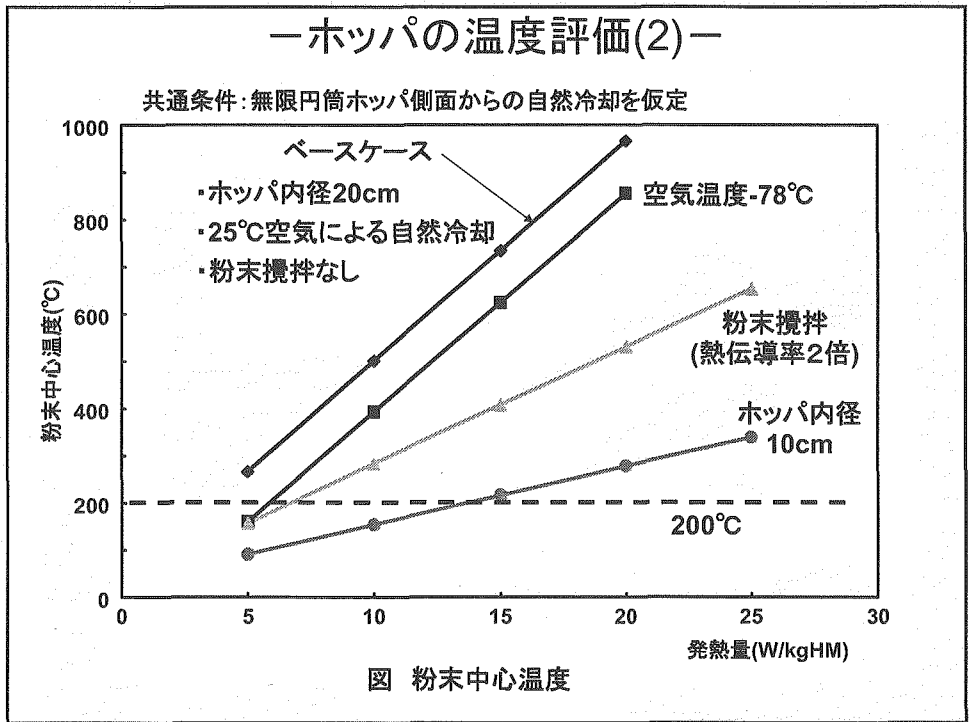


ホツパ

- ・ 粉末の滞留時間は1時間程度
- ・ 不活性ガスをプレス → 成形ホツパ → 粉末投入BOXに通気することは可能

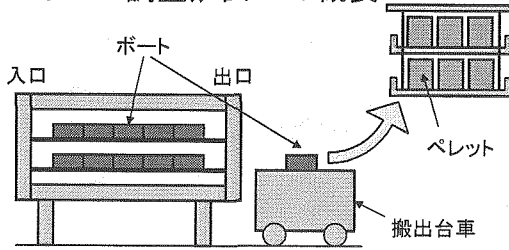


- ・ ホツパ内に不活性ガスを通気
- ・ ホツパ内部に構造物があると粉末の滞留を招くため、極力設置しない



－ペレットの温度評価(1)－

●O/M調整炉出口の概要



O/M調整炉仕様
 Ar-5%H₂ガス通気
 縦置きペレットを2段積みしたボートを装荷
 搬出台車で研削装置まで搬送
 (ボート解体まで約5分)

O/M調整炉～研削装置

- ・台車上での強制冷却は困難
- ・台車及び研削装置を不活性ガス雰囲気にすることは困難

↓

- ・空気雰囲気、自然冷却を想定

－ペレットの温度評価(2)－

条件:ペレットが隙間無く縦26個×横26個×2段積み状態での自然冷却を仮定

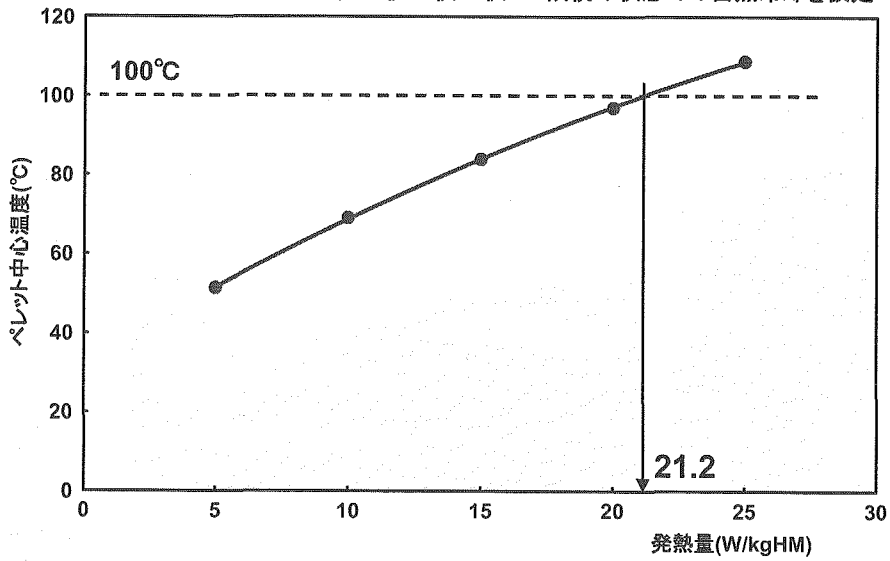
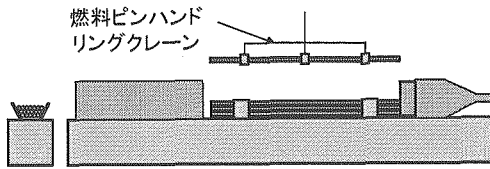


図 ペレット中心温度を100°Cに抑える発熱量

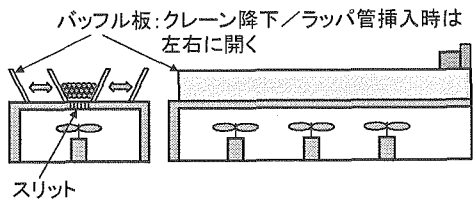
一 集合体組立装置の温度評価(1) 一

● 集合体組立装置の概要



集合体組立装置仕様

横置き組立 クレーンで吊った燃料ピン
 自然冷却 をノックバーに装着する
 4時間で1体組立 時間:約1分



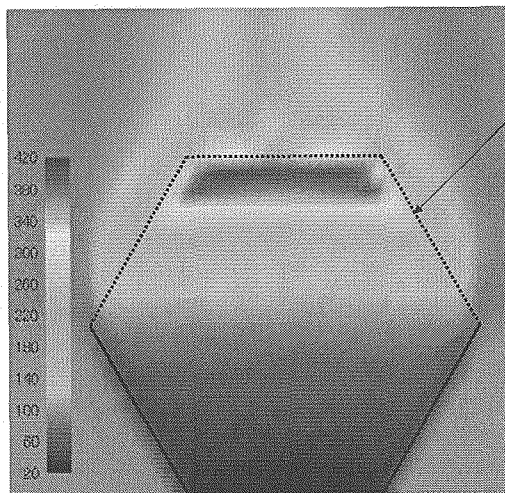
集合体組立装置

- ・ 装置周りのみを不活性ガス雰囲気にすることは困難
- ・ 空気を吹付け、強制冷却することは可能



- ・ 組立装置下面から空気を吹付け強制冷却
- ・ 組立部側面に可動式バッフル板を設置し、空気を燃料ピン間に誘導
- ・ 燃料ピン装着時には、バッフル板を横方向にスライドさせ、クレーンとの干渉を防ぐ

一 集合体組立装置の温度評価(2) 一



燃料バンドルの存在領域

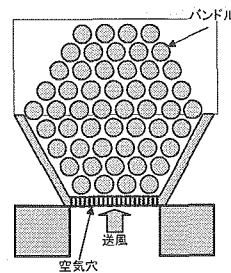
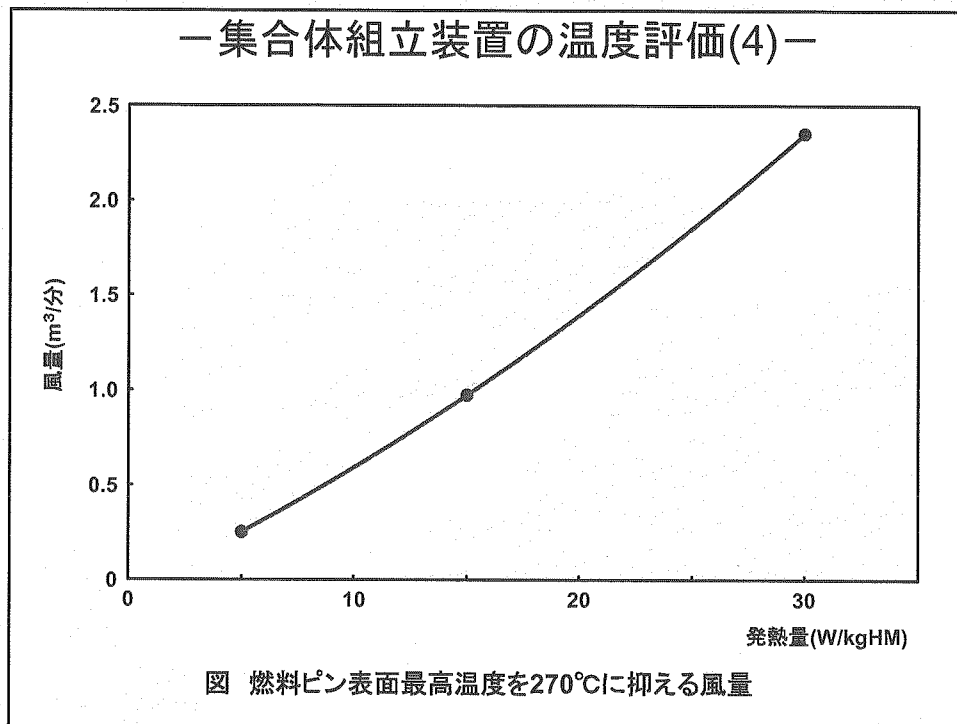
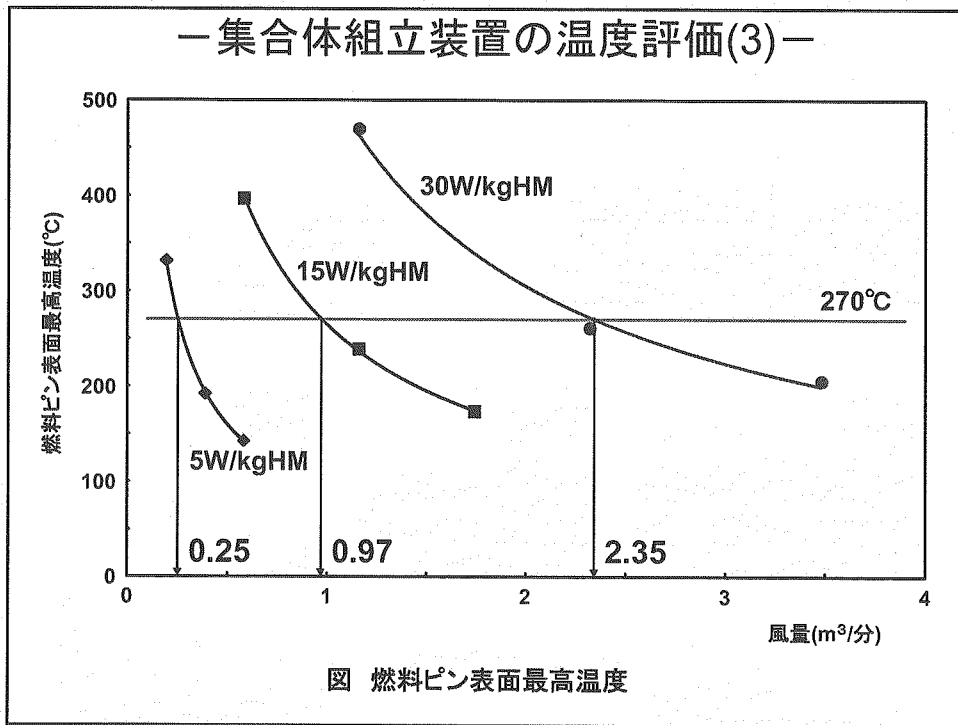


図 横置き組立装置の送風イメージ

図 横置き燃料バンドルの燃料ピン表面温度分布の例
 (30W/kgHM、風量1.2m³/分)



— 評価結果の中間まとめ —

対象設備	雰囲気	暫定制 限温度 (°C)	解析結果		
			温度 (°C)	発熱量 (W/kgHM)	条件
プレス (ホツパ)	不活性ガス	200	200	20.9	ホツパ内径を8cmに 制限
O/M調整炉 ～研削装置	空気	100	100	21.2	自然冷却
集合体組立 装置	雰囲気に 依存しない	270	270	30.0	2.35m ³ /分の空気で 強制冷却

前提条件をコストインパクト小+保守補修性の維持とした場合、
20W/kgHMが1つの発熱量上限と考えられる

ただし、各種計装・ハンドリング装置の温度耐久性及び放射線耐久性
の考慮はなされていない（未設計のため）

上記設備類の設計検討を行い、耐久性を確認する必要がある

平成16年度 第7回研究開発報告会 平成17年2月18日

MA燃焼・核変換量に関する MA燃焼方式の比較検討

システム技術開発部
炉心・燃料システムグループ
杉野 和輝

発表内容

1. 目的
2. 想定されるMA燃焼方式
3. MA燃焼解析法と妥当性確認
4. MA燃焼方式間の比較検討
5. まとめ

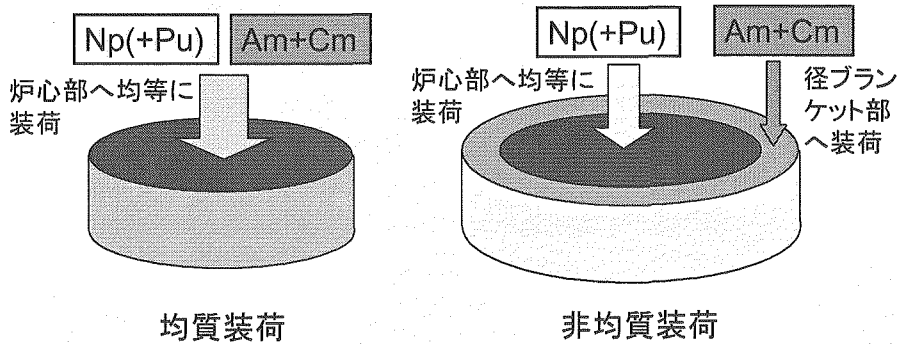
1. 目的

燃料製造性と再処理性の観点から許容MA装荷量を設定し、MA燃焼方式間のMA燃焼特性の比較検討を行い、MA燃焼技術に関する研究開発計画の策定や、高速炉実用期(軽水炉から高速炉への移行期)における最適なMA燃焼方式の選定に資する。

- ◆複雑な工程を有する高速炉の多重リサイクル状態を簡単に精度良くモデル化できる手法を設定する。
- ◆想定されるMA装荷法、リサイクル法及びCm取扱いの組合せによるMA燃焼方式を複数設定し、MA装荷量及び核変換量の比較を行う。

2. 想定されるMA燃焼方式 —装荷法—

・均質装荷／非均質装荷（ハイブリッド装荷）



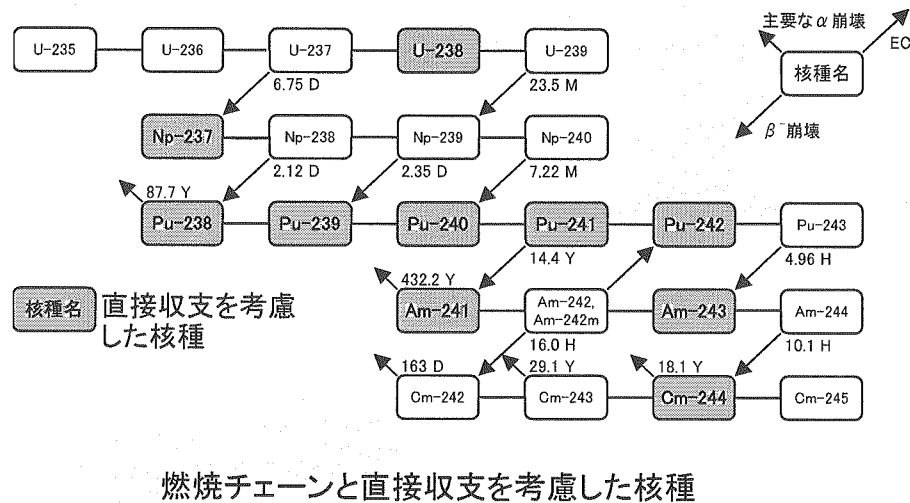
装荷法	核変換率	核特性への影響
均質装荷	○	△
非均質装荷	△	○

2. 想定されるMA燃焼方式 —リサイクル法—

- ◆ 先進湿式再処理を想定
(U+Pu+Np一括回収、Am+Cm回収)
- ◆ 1回目(LWRから全量受入)
 - ・均質リサイクル／非均質リサイクル
(バランス装荷／Am+Cm優先装荷等)
- ◆ 多重リサイクル(平衡状態)
 - ・均質リサイクル／非均質リサイクル
(バランス装荷／Am+Cm優先装荷等)
 - ・Cm直接サイクル／Cm遅延サイクル
(Am+Cmを50年遅延した場合、Am-241は92%に、Cm-244は15%に減少)

3. MA燃焼解析法と妥当性確認 —解析法—

◆主要核種による燃焼行列を用いた解析法



3. MA燃焼解析法と妥当性確認 —解析法—

◆主要核種による燃焼行列を用いた解析法(続き)

$$\begin{pmatrix} W_{EOL}^{U-238} \\ W_{EOL}^{Pu-239} \\ \vdots \\ W_{EOL}^{Cm-244} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{U-238}^{U-238} & B_{U-238}^{Pu-239} & \cdots & B_{U-238}^{Cm-244} \\ B_{Pu-239}^{U-238} & B_{Pu-239}^{Pu-239} & \cdots & B_{Pu-239}^{Cm-244} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{Cm-244}^{U-238} & B_{Cm-244}^{Pu-239} & \cdots & B_{Cm-244}^{Cm-244} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_{BOL}^{U-238} \\ W_{BOL}^{Pu-239} \\ \vdots \\ W_{BOL}^{Cm-244} \end{pmatrix}$$

燃焼後の組成 = 燃焼行列 (単一核種燃焼計算により算出) = 燃焼前の組成

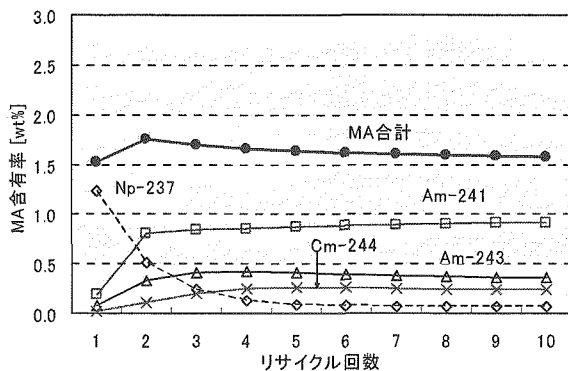
燃焼行列を用いた燃焼計算

E \ B	U238	PU239	PU240	PU241	PU242	PU238	NP237	AM241	AM243	CM244
U238	0.8515	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
PU239	0.0747	0.3205	0.0003	0.0028	0.0000	0.1130	0.0459	0.0281	0.0003	0.0000
PU240	0.0096	0.1115	0.6262	0.0008	0.0047	0.0169	0.0043	0.0028	0.0555	0.1585
PU241	0.0006	0.0109	0.0917	0.1539	0.0004	0.0012	0.0002	0.0002	0.0039	0.0150
PU242	0.0000	0.0011	0.0142	0.0900	0.6918	0.0001	0.0000	0.0600	0.0003	0.0014
PU238	0.0001	0.0002	0.0028	0.0276	0.0000	0.3872	0.3039	0.1983	0.0001	0.0002
NP237	0.0004	0.0000	0.0001	0.0007	0.0000	0.0001	0.3822	0.0048	0.0000	0.0000
AM241	0.0001	0.0015	0.0183	0.0964	0.0000	0.0001	0.0000	0.3705	0.0004	0.0020
AM243	0.0000	0.0001	0.0011	0.0114	0.1282	0.0000	0.0000	0.0133	0.4281	0.0001
CM244	0.0000	0.0000	0.0002	0.0029	0.0439	0.0000	0.0000	0.0037	0.3176	0.4237

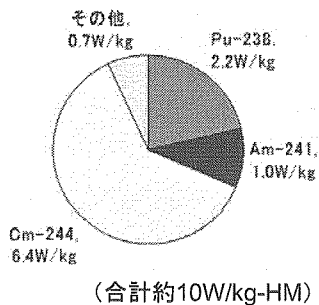
燃焼行列の例

3. MA 燃焼解析法と妥当性確認 — 解析例 —

◆ 均質装荷/非均質 Cm 直接リサイクル



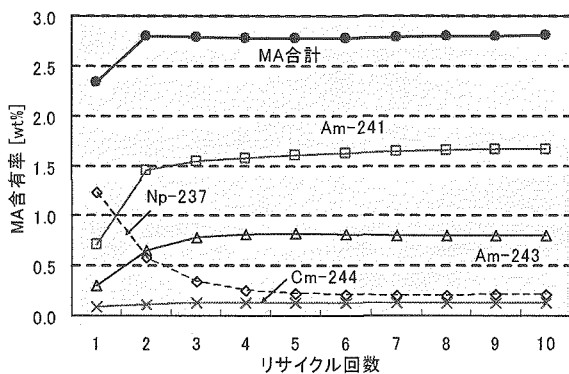
リサイクルによるMA含有率の推移 (炉心部)



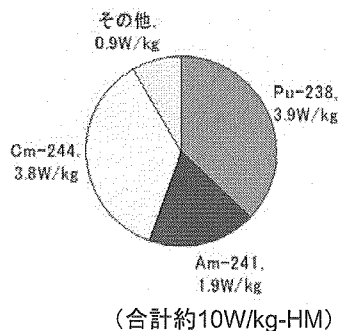
平衡時重金属発熱量内訳 (炉心部)

3. MA 燃焼解析法と妥当性確認 — 解析例 —

◆ 均質装荷/非均質 Cm 遅延リサイクル



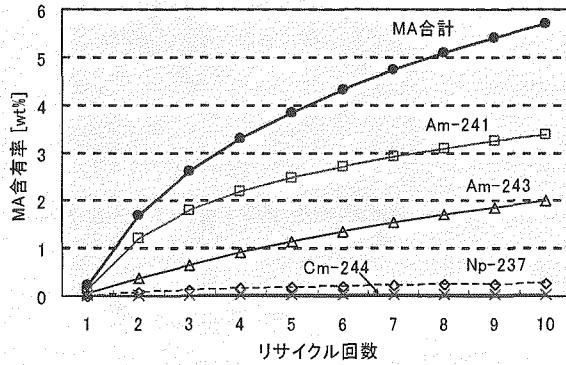
リサイクルによるMA含有率の推移 (炉心部)



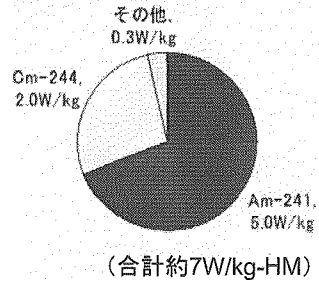
平衡時重金属発熱量内訳 (炉心部)

3. MA燃焼解析法と妥当性確認 —解析例—

◆非均質装荷/非均質Cm遅延リサイクル



リサイクルによるMA含有率の推移
(径ブランケット部)



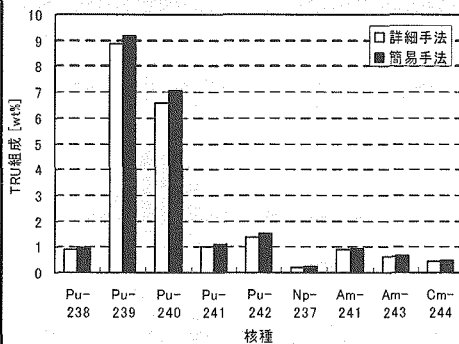
平衡時重金属発熱量内訳
(径ブランケット部)

3. MA燃焼解析法と妥当性確認 —妥当性確認—

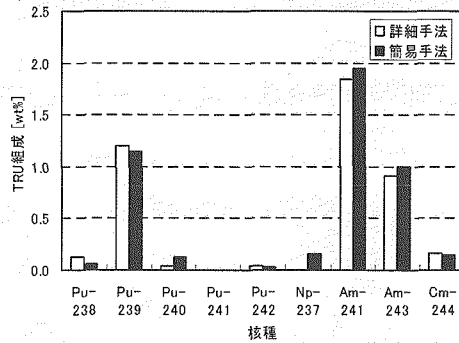
◆詳細計算結果との比較

- ・詳細計算: F/Sの核設計手法
- ・簡易計算: 燃焼行列法、Pu-f富化度一定

◆リサイクル6回目の取出燃料組成解析結果を比較



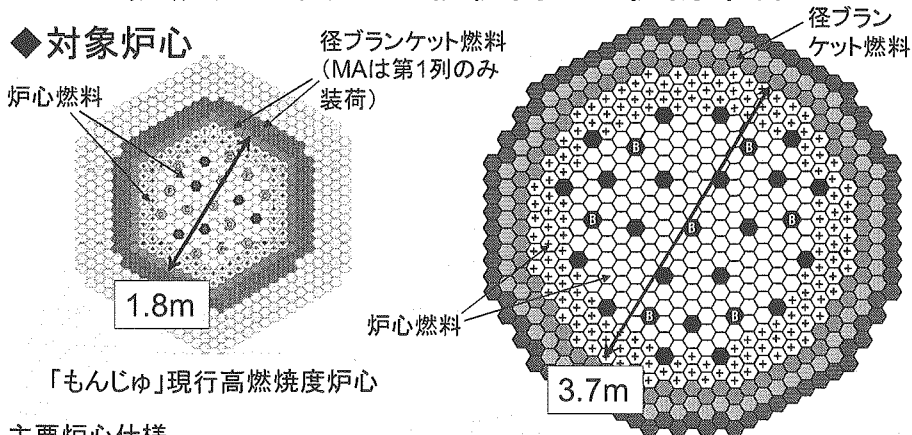
均質装荷比較例 (炉心部)



非均質装荷比較例 (径ブラ部)

4. MA燃焼方式間の比較検討 — 検討条件 —

◆対象炉心



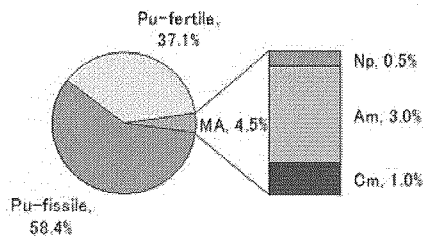
主要炉心仕様

項目	「もんじゅ」炉心	実用期炉心
電気/熱出力 [MWe]/[MWt]	280/714	750/1,785
炉心高さ [cm]	93	100
運転サイクル長さ [日]	148	793
燃料交換バッチ数	5	4
炉心部取出平均燃焼度 [GWd/t]	80	150
炉心燃料重金属重量 [kg]	29.7	107.4
径ブランケット燃料重金属重量 [kg]	73.6	222.5

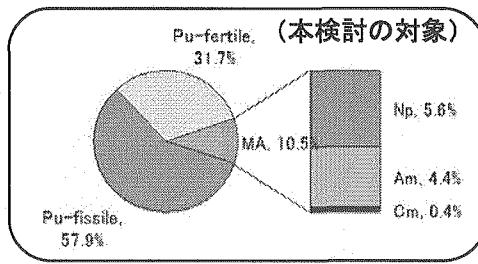
実用期炉心
(中型MOX燃料高内部
部転換型炉心)

4. MA燃焼方式間の比較検討 — 検討条件 —

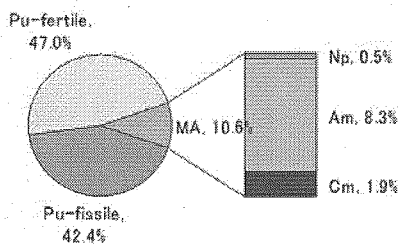
◆TRU組成



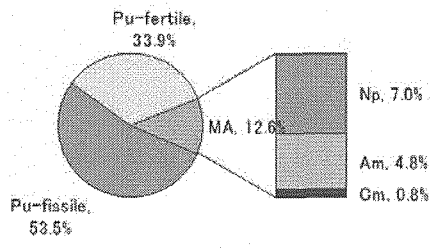
高速炉多重リサイクル(比較用)



UO₂燃料軽水炉取出



MOX燃料軽水炉取出(参考)



UO₂燃料改良型軽水炉取出(参考)

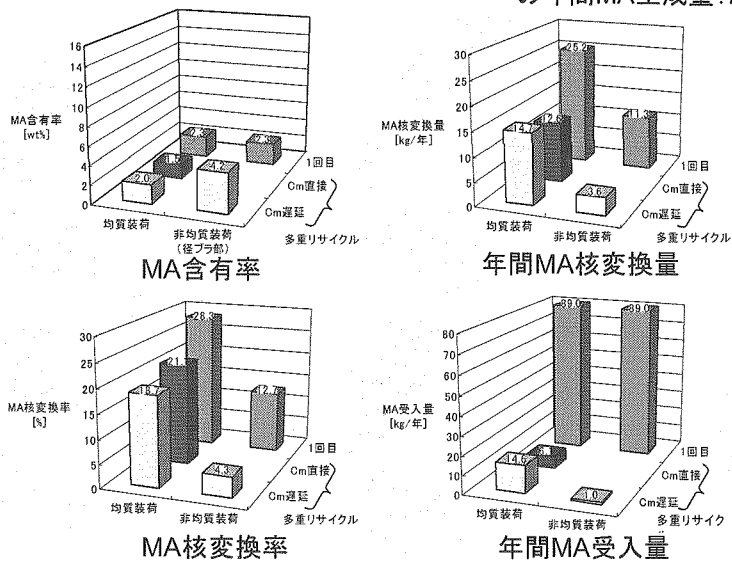
4. MA 燃焼方式間の比較検討 — 検討条件 —

- ◆ 軽水炉使用済燃料からの受入量(1回目)
 - ・Pu+Np: 全量
 - ・Am+Cm: Pu+Np量とバランス／独立に追加
- ◆ 軽水炉使用済燃料からの受入量(リサイクル時)
 - ・Pu+Np: 高速炉のブランケット量により調整
 - ・Am+Cm: Pu+Np量とバランス／独立に優先
- ◆ 制限条件
 - ・製造時発熱量制限:
 - 10W/kg-HM(現状暫定)
 - 20W/kg-HM(緩和見通し)
 - ・使用済燃料発熱量制限(取出後4年冷却):
 - 2kW/集合体(現状暫定)

4. MA 燃焼方式間の比較検討 — 解析結果 —

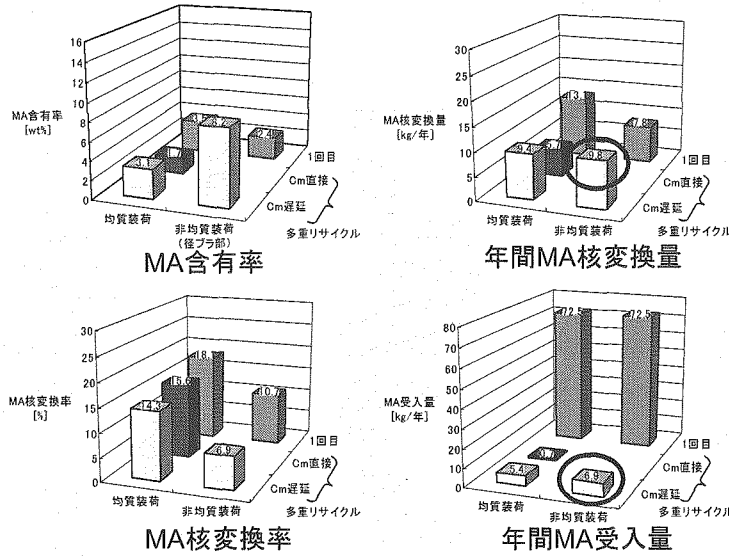
◆ 実用期炉心(バランス装荷)

※1,000MWe級軽水炉からの年間MA生成量: 約20kg



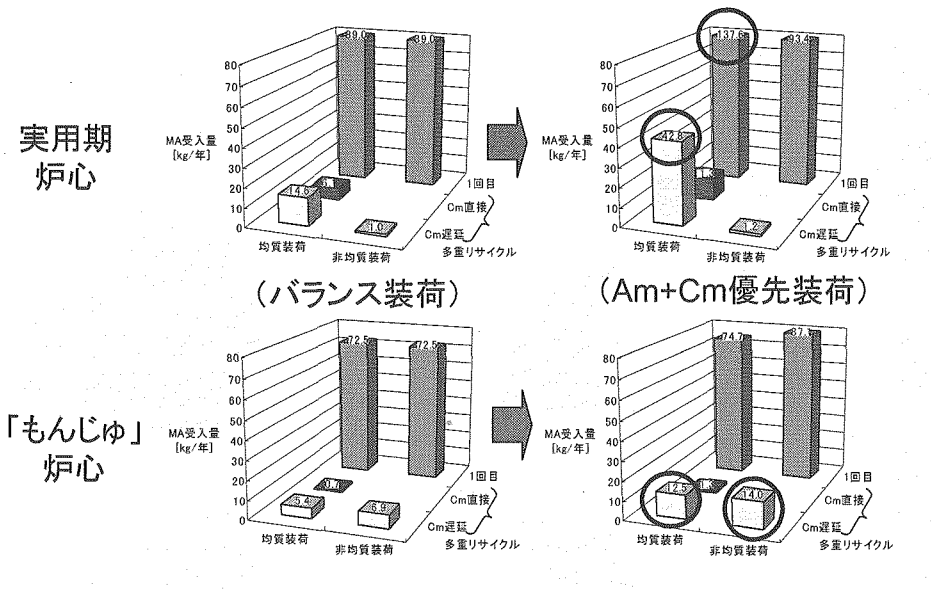
4. MA燃焼方式間の比較検討 ー解析結果ー

◆「もんじゅ」炉心(バランス装荷)



4. MA燃焼方式間の比較検討 ー解析結果ー

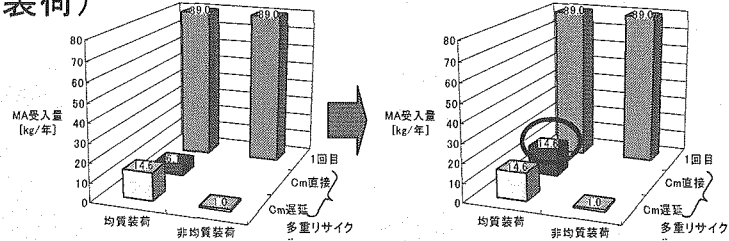
◆Am+Cmを優先させて装荷した場合の年間MA受入量



4. MA燃烧方式間の比較検討 ー解析結果ー

◆製造時発熱量制限が緩和された場合の年間MA受入量 (バランス装荷)

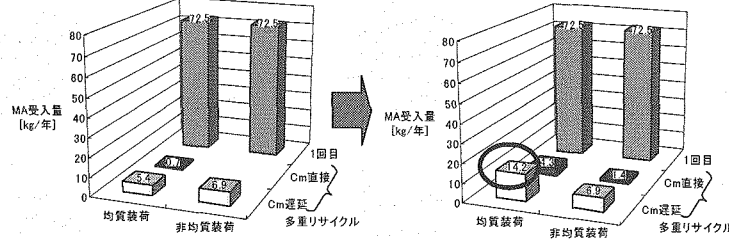
実用期
炉心



(10W/kg-HM制限)

(20W/kg-HM制限)

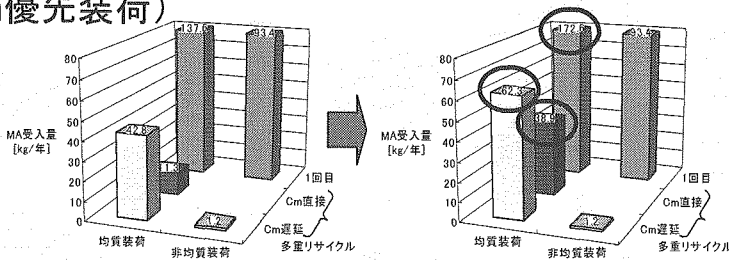
「もんじゅ」
炉心



4. MA燃烧方式間の比較検討 ー解析結果ー

◆製造時発熱量制限が緩和された場合の年間MA受入量 (Am+Cm優先装荷)

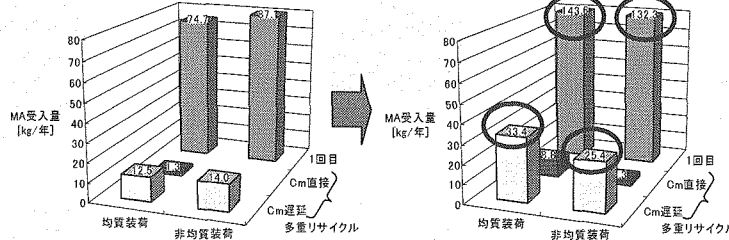
実用期
炉心



(10W/kg-HM制限)

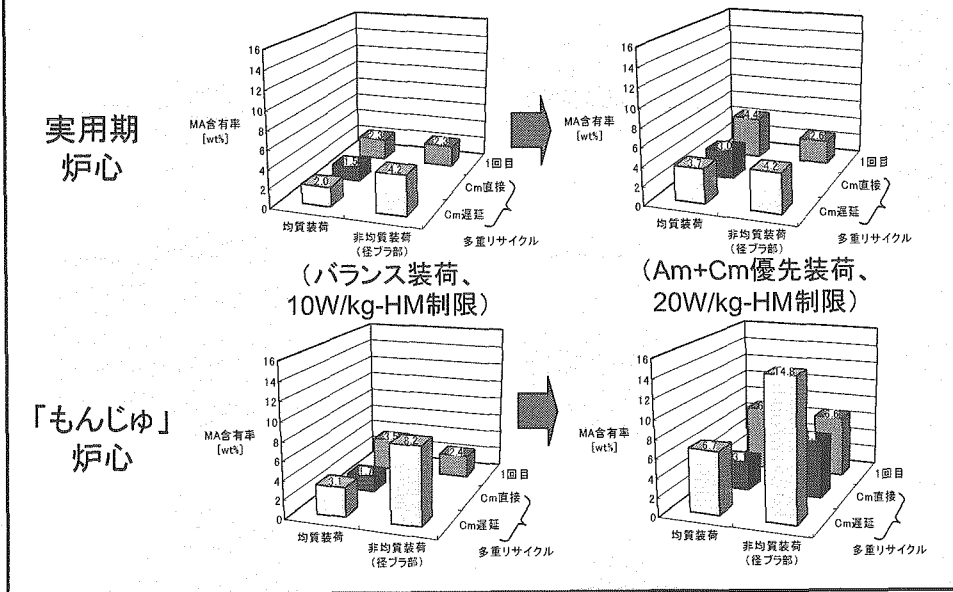
(20W/kg-HM制限)

「もんじゅ」
炉心



4. MA燃烧方式間の比較検討 — 解析結果 —

◆MA含有率の比較



4. MA燃烧方式間の比較検討 — 結果まとめ —

(1) 実用期炉心

- MA含有率は最大でも4wt%程度である。
- MA受入量の観点からは均質装荷が優位であり、多重リサイクル平衡状態で最大年間約60kgのMA受け入れが可能である。
- 製造時発熱量制限の緩和によるMA燃烧特性の向上は、Am+Cm優先装荷の場合に著しく見られ、MA受入量は多重リサイクル平衡状態で年間20~30kg増加する。

(2) 「もんじゅ」炉心

- MA含有率は炉心部で最大約7wt%、径ブランケット部で最大約15wt%に達する。
- MA受入量の観点からは装荷法に大差はなく、多重リサイクル平衡状態で最大で年間約30kgのMA受け入れが可能である。
- 製造時発熱量制限の緩和によるMA燃烧特性の向上は、Am+Cm優先装荷の場合に著しく見られ、MA受入量は多重リサイクル平衡状態で年間10~20kg増加する。

5. まとめ

燃料製造性と再処理性の観点から許容MA装荷量を設定し、MA燃焼方式間のMA燃焼特性の比較検討を行った。

- ◆複雑な工程を有する高速炉の多重リサイクル状態を簡単に精度良くモデル化するために、単一核種燃焼計算に基づく燃焼行列を用いた簡易手法を設定した。
- ◆前提条件として、製造時発熱量制限を10W/kg-HM、使用済燃料発熱量制限を2kW/集合体として、想定されるMA燃焼方式を複数設定し、MA装荷量及び核変換量の比較を行なった。また、製造時発熱量制限が20W/kg-HMIに緩和された場合のMA受入量の増加について検討を行った。
- ◆Am+Cm優先装荷とした場合には、MA受入量は製造時発熱量制限により大幅に変化することから、その制限の設定は重要である。

(5) MA装荷炉心の炉心特性 に関する検討

システム技術開発部
中性子工学Gr
大木 繁夫



平成16年度 第7回 研究開発報告会
平成17年2月18日
於 FBRサイクル国際研究開発センター(フェルボ)1階 シュミレータ室

内容

1. MAによる炉心特性影響とその不確かさ

- ① MAによる炉心特性変化
- ② 不確かさ評価

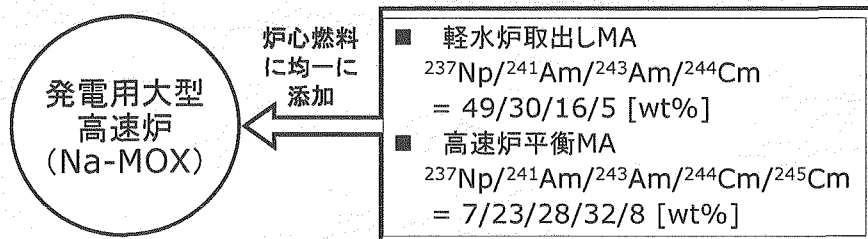
2. 不確かさの低減を目指して

- ① 「常陽」MAサンプルPIE解析
 - ② 今後の展開
-

1. MAによる炉心特性影響と その不確かさ

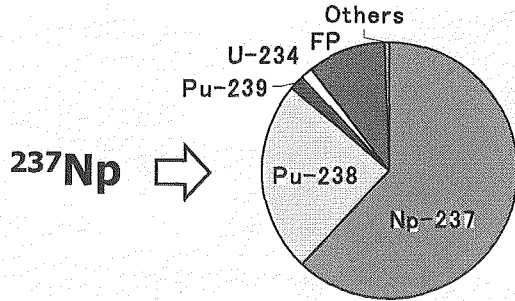
① MAによる炉心特性変化

- MAを高速炉炉心に装荷したときの炉心特性への影響についてレビューする。



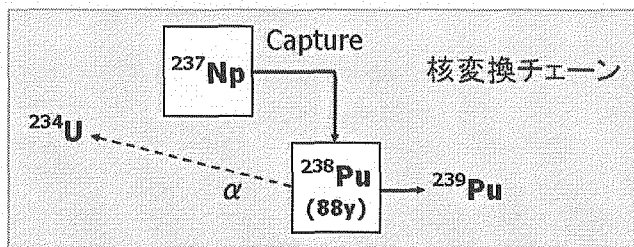
- 着目する炉心特性: 燃焼欠損反応度、増殖比、Naボイド反応度、ドップラー係数、取出し燃料の崩壊熱・中性子発生量・ γ 線エネルギー放出

高速炉におけるMAの核変換

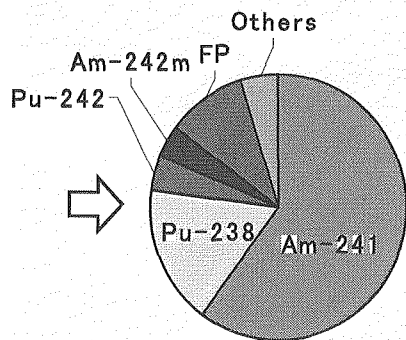


^{237}Np →

<計算条件>
 $\Phi = 1 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$
 2700日燃焼、4年冷却

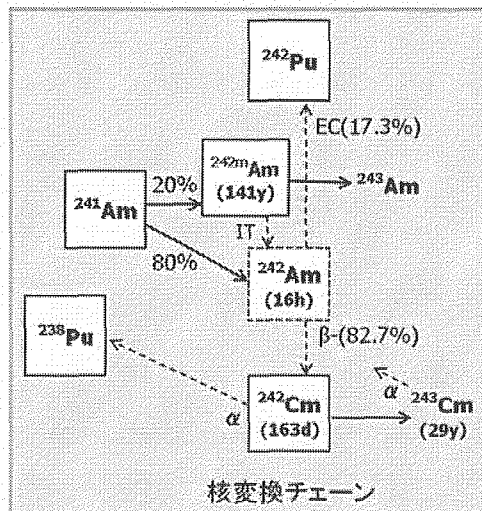


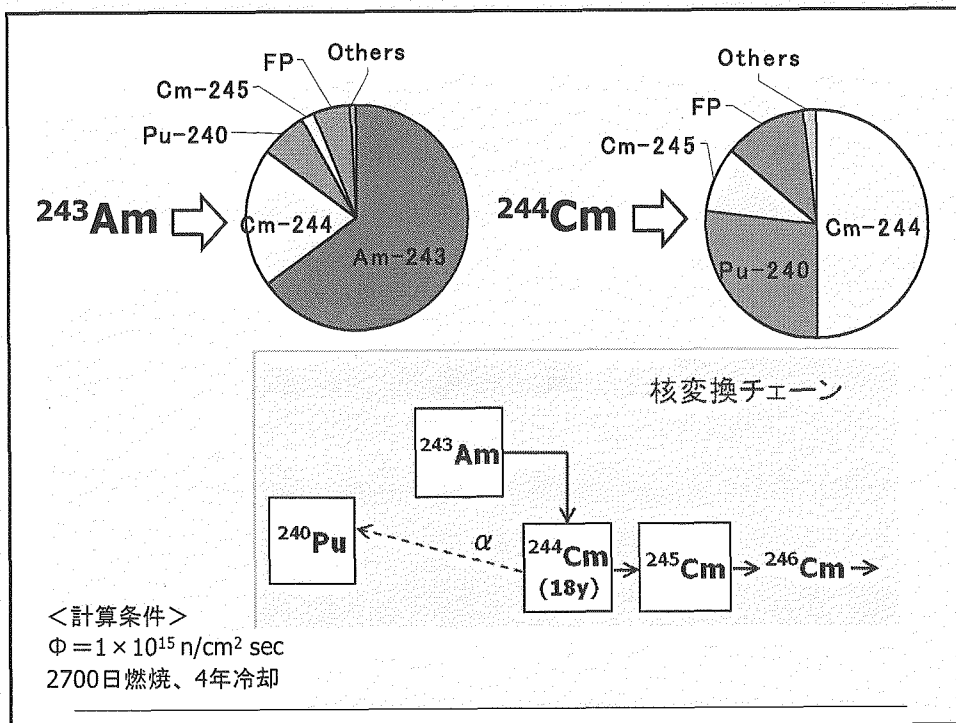
^{241}Am



→

<計算条件>
 $\Phi = 1 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$
 2700日燃焼、4年冷却





MAの核分裂性と親物質としての性質

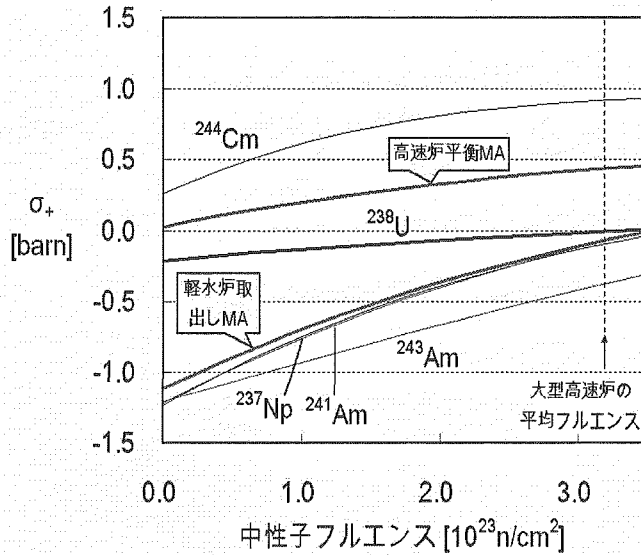
□ アクチニド核種の σ_+ 値

$$\sigma_+ = \nu\sigma_f - \sigma_a$$

反応度に
比例する量

核種	σ_+ [barn]	核種	σ_+ [barn]
²³⁵ U	2.27	²⁴² Pu	-0.01
²³⁸ U	-0.21	²⁴¹ Am	-1.23
²³⁷ Np	-1.22	^{242m} Am	6.85
²³⁸ Pu	1.49	²⁴³ Am	-1.21
²³⁹ Pu	2.98	²⁴³ Cm	7.34
²⁴⁰ Pu	0.13	²⁴⁴ Cm	0.27
²⁴¹ Pu	4.68	²⁴⁵ Cm	6.65

□ 燃焼によるMAの反応度価値の変化



◆ 軽水炉取出しMA
 σ_+ : 大きな負が正側に近づく
 ↓
 燃焼反応度減少
 ↓
 Pu富化度減少
 ↓
 増殖比増加

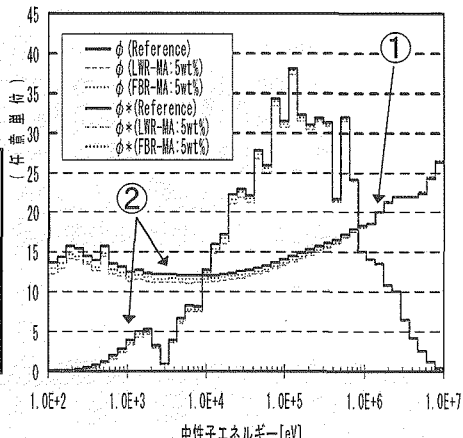
◆ 高速炉平衡MA
 σ_+ : 正の値をとる
 ↓
 Pu富化度減少
 ↓
 燃焼反応度減少
 ↓
 増殖比増加

反応度係数 (Naボイド、ドップラー) への影響

MA装荷 → U・Pu押しのけられ減少
 ・軽水炉取出しMA (LWR-MA)
 ^{237}Np , ^{241}Am は良好な親物質
 ・高速炉平衡MA (FBR-MA)
 ^{245}Cm は核分裂性が大きい
 ↓
 Pu富化度減少 → U増加 → U減少

ドップラー定数に対する直接効果

ϕ, ϕ^* の変化 (間接効果)
 ① MeV領域の ϕ^* 勾配増加
 ② keV領域の ϕ, ϕ^* 減少



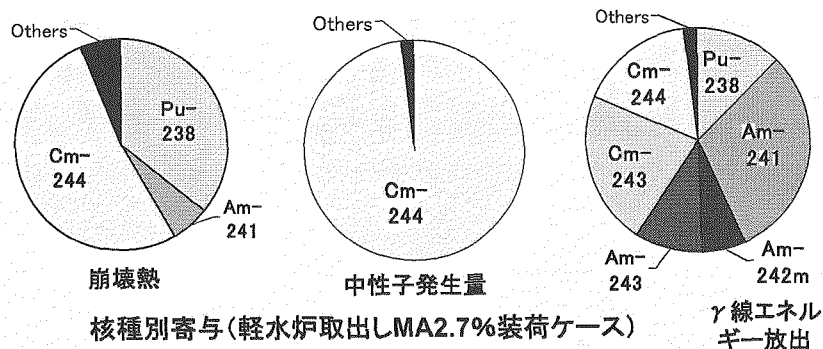
MA添加による中性子スペクトル及び随伴中性子スペクトルの変化

Naボイド反応度増加
 ドップラー定数 (絶対値) の減少

崩壊熱・中性子発生量・γ線エネルギー放出

□ MAによる標記特性量の増加(高速炉取出し燃料、冷却4年)

	MA装荷なし (レファレンス)	軽水炉取出しMA 2.7%装荷	高速炉平衡MA 1%装荷
崩壊熱	1.0	3.3	2.8
中性子発生量	1.0	4.7	5.7
γ線エネルギー放出	1.0	2.9	2.0

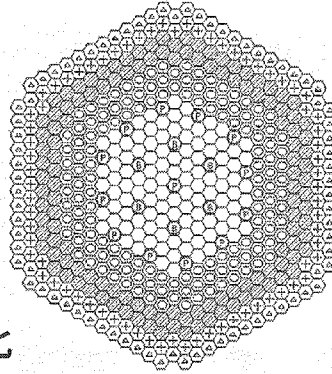


② 不確かさ評価

- 核データに起因する核特性の不確かさを評価する。
- 対象炉心 600MWe級 高速増殖炉(Na-MOX)
- MA装荷ケース
 - レファレンス: MA装荷なし
 - 軽水炉取出しMAを2.7%(MA/HM)装荷
 - 高速炉平衡MAを1%(MA/HM)装荷
- 評価対象量
 - 実効増倍率(BOC)
 - Naボイド反応度(BOC)
 - 燃焼欠損反応度
 - 取出し燃料の崩壊熱・中性子発生量・γ線エネルギー放出

対象高速炉の基本仕様

- 電気出力: 600 MW_e
- 熱出力: 1600 MW_{th}
- 運転サイクル長さ: 375 EFPD
- 燃料交換バッチ数: 3
- 取出平均燃焼度: 85700 MWd/t
- プルトニウム富化度: 約19 wt% (Pu/HM)



MA装荷による炉心特性変化

	MA装荷なし (レファレンス)	軽水炉取出LMA 2.7%装荷	高速炉平衡MA 1%装荷
実効増倍率(BOC)	1.0422	1.0354	1.0412
Naボイド反応度(BOC) [%]	5.0	6.2	5.3
燃焼欠損反応度 [%Δk/kk]	3.5	2.6	3.2
崩壊熱* [W/cm ³]	0.014	0.047	0.040
中性子生成量* [n/sec/cm ³]	2.1E+04	9.8E+04	1.2E+05
γ線エネルギー放出* [MeV/sec/cm ³]	8.1E+07	2.4E+08	1.6E+08

* 取出し燃料(4年冷却)、重核種の寄与のみ。

不確かさ評価方法

- 核データに起因する不確かさ(分散)は次の誤差伝播式により算出する:

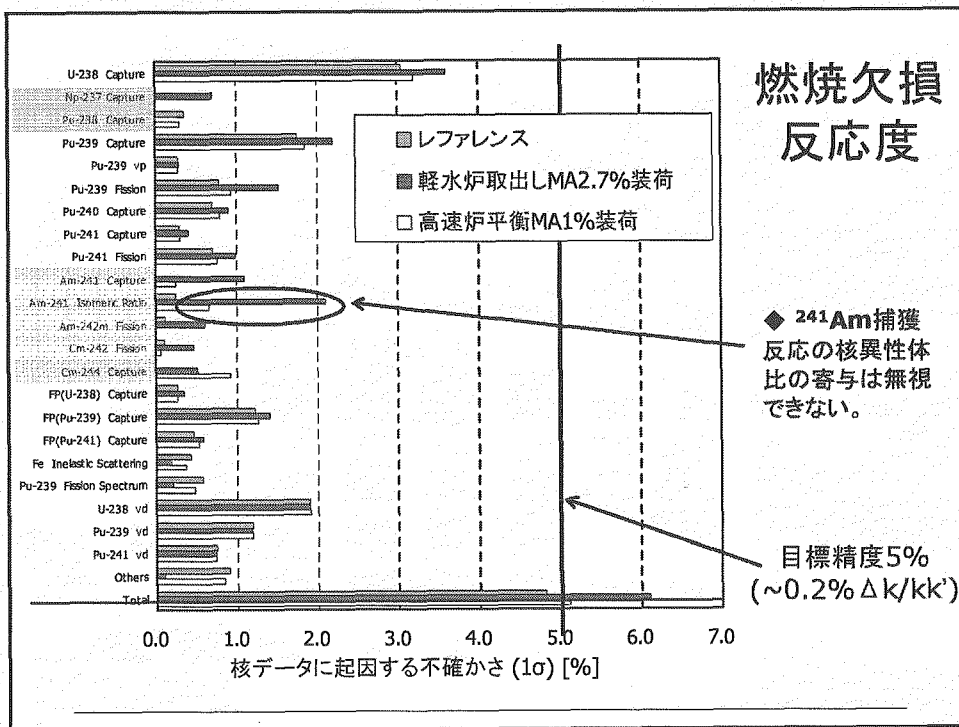
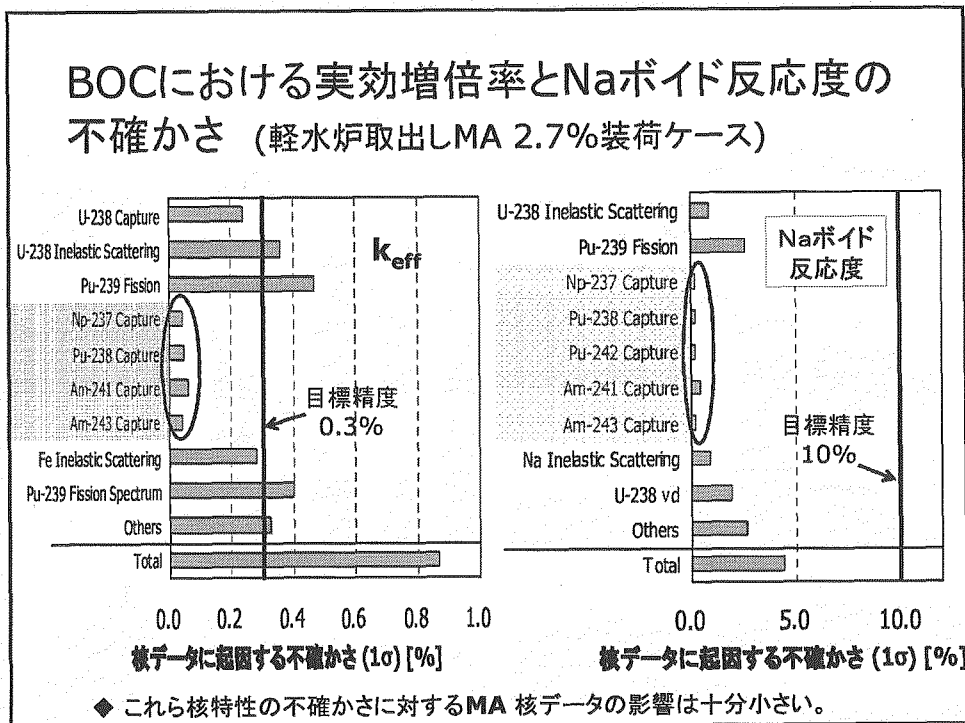
$$V(R) = \sum_{i,j} G_i^R M_{ij} G_j^R$$

$$G_i^R = \frac{dR}{d\sigma_i} \quad \text{核特性Rの断面積感度係数}$$

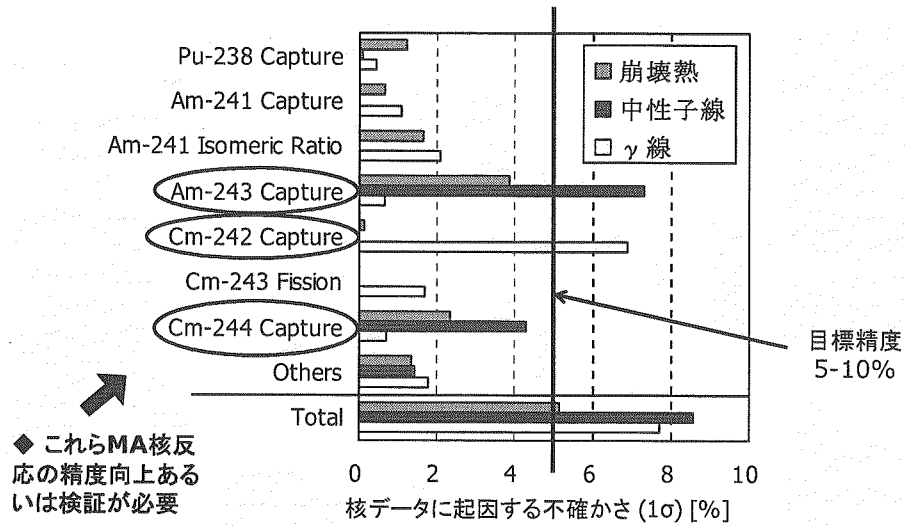
$$M_{ij} = V(\sigma_i, \sigma_j) \quad \text{断面積共分散}$$

(i,j: 核種、反応、エネルギー群の添字)

JENDL共分散ファイルを使用(Cm等共分散のないものは、核データのバラツキより概略推定)

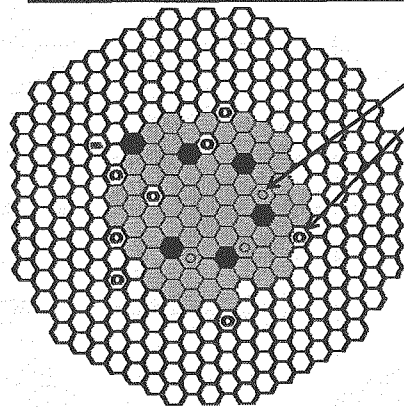


崩壊熱・中性子発生量・ γ 線エネルギー放出量
の不確かさ (軽水炉取出しMA 2.7%装荷ケース)



2. 不確かさの低減を目指して

①「常陽」MAサンプルPIE解析



MAサンプル照射位置
 第3列, 276 EFPD (第29-33サイクル)
 第5列, 251 EFPD (第30-33サイクル)

炉心アドレス	軸方向位置	MAサンプル (総数: 16)
第3列 (3B2)	炉中心	^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm
	350 mm上部 (反射体内)	^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm
第5列 (5B5)	炉中心	^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm
	350 mm上部 (反射体内)	^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm

ドライバ燃料 照射試験用集合体
 制御棒 反射体

JOYO MK-II 炉心 (第32サイクル)

これまでに下線のサンプルの予備解析を終了

照射後組成比に着目

$$\frac{{}^{242m}\text{Am}(t)}{{}^{241}\text{Am}(t)} \propto (1 - IR) \sigma_c^{\text{Am}-241} \phi t + \dots$$

^{241}Am 捕獲反応の核異性体比 (g/(g+m))

$$\frac{{}^{245}\text{Cm}(t)}{{}^{244}\text{Cm}(t)} \propto \sigma_c^{\text{Cm}-244} \phi t + \dots$$

<主たる因子>

生成元核種の捕獲反応断面積、
核異性体比、中性子フルエンス

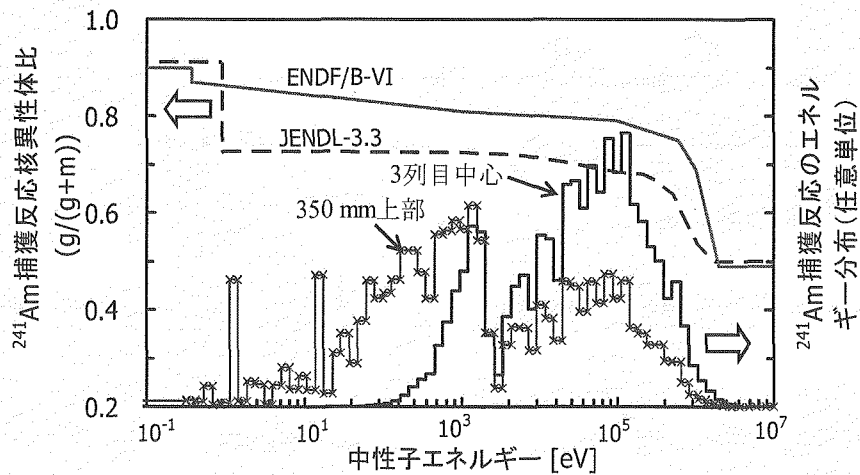
照射後組成比^{242m}Am/²⁴¹Amに対するC/E値

本解析ではパラメータとした。

着目する照射後組成比	MAサンプル	²⁴¹ Am捕獲反応核異性体比 (g/(g+m)) IR	C/E値				測定誤差 (1σ)
			JENDL-3.2	JENDL-3.3	ENDF/B-VI.5	JEF-2.2	
^{242m} Am/ ²⁴¹ Am	²⁴³ Am(3列目)	0.88	1.04				
		0.85	1.28	1.30	1.19	1.32	2%
	350mm上部	0.80	1.67				
	²⁴³ Am(3列目中心)	0.88	0.81				
		0.85	0.99	1.07	0.94	1.15	<1%
			0.80	1.30			

- 中心サンプルでは、IRは0.85付近と考えられる。
- 上部サンプルではスペクトルの軟化によるIR増加の可能性
がある(※ 再現性を含め今後さらに検討する)。

²⁴¹Am捕獲反応の核異性体比の現状



ENDF/B-VI: IR=0.80 (350mm上部), IR=0.79 (3列目中心)
 JENDL-3.3: IR=0.70 (350mm上部), IR=0.69 (3列目中心)

- ENDF/B-VIとJENDL-3.3のIRは小さすぎ、見直しが望まれる。

Cm同位体の照射後組成比に対するC/E値

着目する照射 後組成比	MAサンプル	C/E値				測定 誤差 (1σ)
		JENDL- 3.2	JENDL- 3.3	ENDF/B- VI.5	JEF-2.2	
²⁴⁴ Cm/ ²⁴³ Am	²⁴³ Am(3列目350mm上部)	1.10	1.10	1.09	1.16	~5%
	²⁴³ Am(3列目中心)	0.80	0.84	0.78	0.90	~10%
²⁴⁵ Cm/ ²⁴⁴ Cm	²⁴³ Am(3列目中心)	1.18	1.22	1.46	0.99	<1%
	²⁴⁴ Cm(3列目中心)	1.10	1.11	1.28	0.98	1%
²⁴⁶ Cm/ ²⁴⁵ Cm	²⁴³ Am(3列目中心)	0.89	1.33	0.77	0.79	3%

- ²⁴⁴Cm/²⁴³Am比については、α線測定に起因する誤差が大きい。→測定誤差の低減を検討中。
- ENDF/B-VIの²⁴⁴Cm捕獲反応、JENDL-3.3の²⁴⁵Cm捕獲反応は、断面積が過大評価の傾向にある。

② 今後の展開

- 炉定数調整法により、核特性予測精度の向上に、積分実験データを直接活用することができる。

調整後の断面積

$$|\tilde{\sigma}\rangle = |\sigma\rangle + \sum_{\alpha, \beta} \mathbf{M} |G^{R_\alpha}\rangle W_{\alpha\beta} (R_{\text{exp}}^\beta - R_{\text{calc}}^\beta)$$

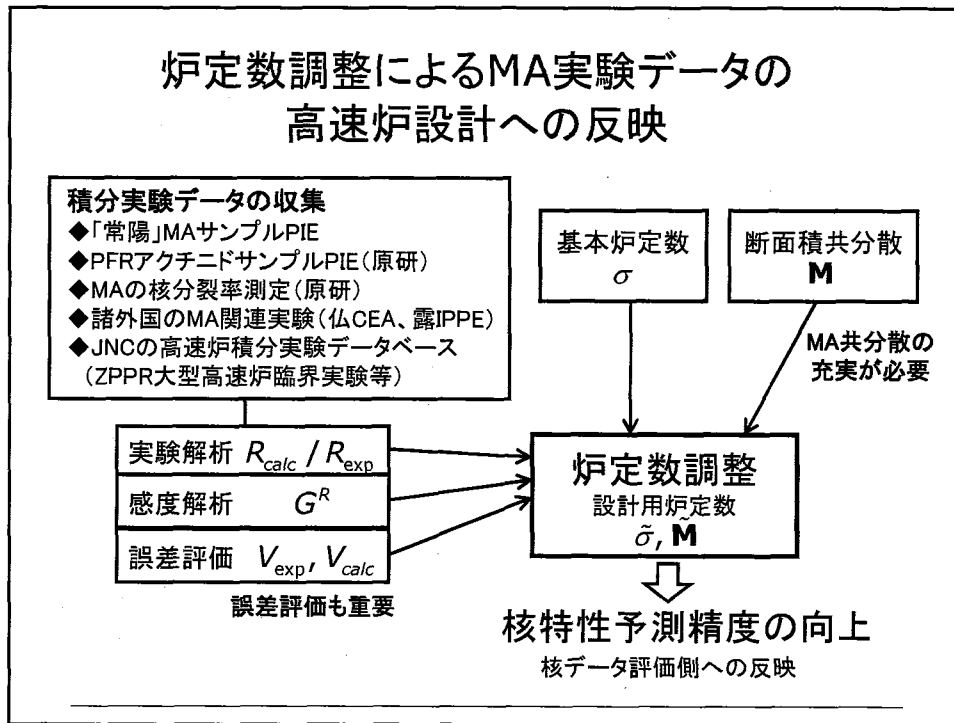
where $W_{\alpha\beta} = \left[\langle G^{R_\beta} | \mathbf{M} | G^{R_\alpha} \rangle + V_{\text{exp}}^{\beta\alpha} + V_{\text{calc}}^{\beta\alpha} \right]^{-1}$

α、β：積分実験データの添字

※核種・反応・エネルギー空間は
行列形式で表記

$V_{\text{exp}}^{\beta\alpha} = V(R_{\text{exp}}^\beta, R_{\text{exp}}^\alpha)$ 実験誤差

$V_{\text{calc}}^{\beta\alpha} = V(R_{\text{calc}}^\beta, R_{\text{calc}}^\alpha)$ 解析誤差



まとめ

- MA装荷高速炉の炉心特性について、核データに起因する不確かさを評価した。精度向上を図るべき核種・反応が定量的に明らかとなった。
- 上記不確かさの低減を目指して、「常陽」MAサンプルPIE解析に着手した。 ^{243}Am , ^{244}Cm (計3個)の予備解析を行い、特に ^{241}Am 捕獲反応の核異性体比の不確かさを大幅に減少させる解析結果を得た。
- MA実験データを高速炉設計に反映させる研究開発を今後進めていく予定である。