

科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会原子力科学技術委員会  
核融合研究作業部会  
平成24年9月25日

# 核融合エネルギーの特徴と 核融合炉の安全性・安心感

東京大学大学院新領域創成科学研究科

小川 雄一

謝辞: (社)プラズマ・核融合学会  
核融合エネルギーアセスメントに関するタスクフォース 委員会

# 核融合エネルギーアセスメントに関するタスクフォース

## (社)プラズマ・核融合学会

### (1)趣旨

東日本大震災に伴う福島第一原発での事故のため、将来のエネルギー源としての原子力エネルギーの位置付けの見直しの議論が活発となっている。一方、同じ核エネルギーではあるが、核融合エネルギーおよび核融合炉は、核分裂エネルギーおよび原子炉とは異なった特徴・特性を有している。ここでは核融合エネルギーの特徴や核融合炉の安全性等の特性を踏まえ、核融合エネルギー開発に対するアセスメントをまとめる。

### (2)メンバー(敬称略)

#### @学会側(理事)

- ・小川雄一(東大)・西村 新(NIFS)・二宮博正(JAEA)・小森彰夫(NIFS)
- ・疇地宏(阪大)・清水克祐(三菱重工)・堀池寛(阪大)・笹尾真実子(東北大)

#### @専門委員

- ・原子力機構: 飛田健次、林巧、坂本宜照、谷川尚
- ・核融合研: 相良明男、室賀健夫、長坂琢也、田中照也
- ・大学: 横峰健彦(京大)、杉山貴彦(名大)、笠田竜太(京大)
- ・産業界: 岡野邦彦(電中研)、甲斐俊也(東芝)
- ・オブザーバ: 山田弘司科学官、門信一郎学術調査官

・核融合科学研究所の一般共同研究「核融合エネルギーの特性と安全性に関するアセスメント(代表:小川雄一)」と連携

・平成12年の核融合会議開発戦略検討分科会「核融合エネルギーの技術的実現性、計画の拡がりと裾野としての基礎研究に関する報告書」などの先駆的調査を参考

## 核融合炉の安全性

- ・原子炉の安全性は、  
「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」が原則
- ・核融合炉では、核的暴走はせず、自動的に【止まる】

## 福島第一原子力発電所の事故

- ・原子炉は停止。 <= 「止める」
- ・崩壊熱に対する除熱が不十分 <= 「冷やす」
- ・放射性物質が環境に放出 <= 「閉じ込める」

# 核融合炉の安全性・安心感

## ●核融合炉の崩壊熱

- ・崩壊熱の評価
- ・除熱能力の評価
- ・安全対策(受動的、能動的)

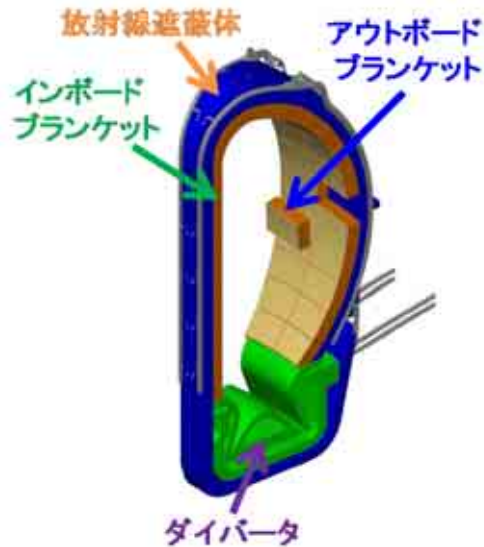
## ●放射性物質の環境放出

- ・内包する放射性物質の定量評価
- ・閉じ込め機能の評価
- ・安全対策(受動的、能動的)

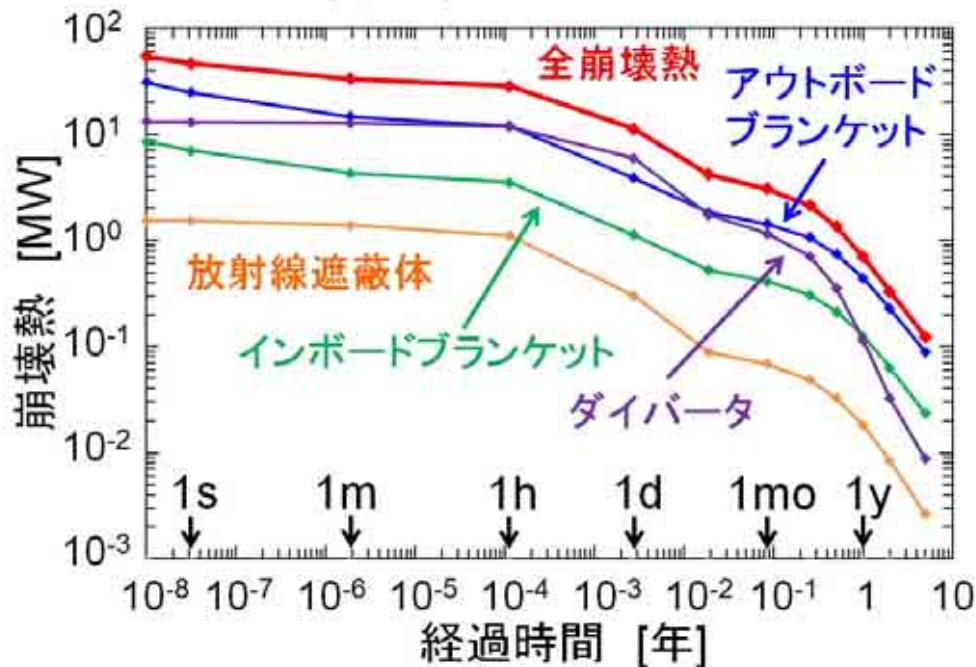
→社会の核融合に対する安心感の醸成

# 核融合炉の崩壊熱(1)

(核融合炉出力 : 3.0GW Slim CSの場合)



核融合出力	3.0 GW			単位: MW
経過時間	停止	1日	1ヶ月	
アウトボードB	30.87	3.88	1.42	
インボードB	8.58	1.13	0.41	
ダイバータ	13.1	5.97	1.16	
放射線遮蔽体	1.79	0.34	0.08	
全崩壊熱	54.1	11.3	3.1	

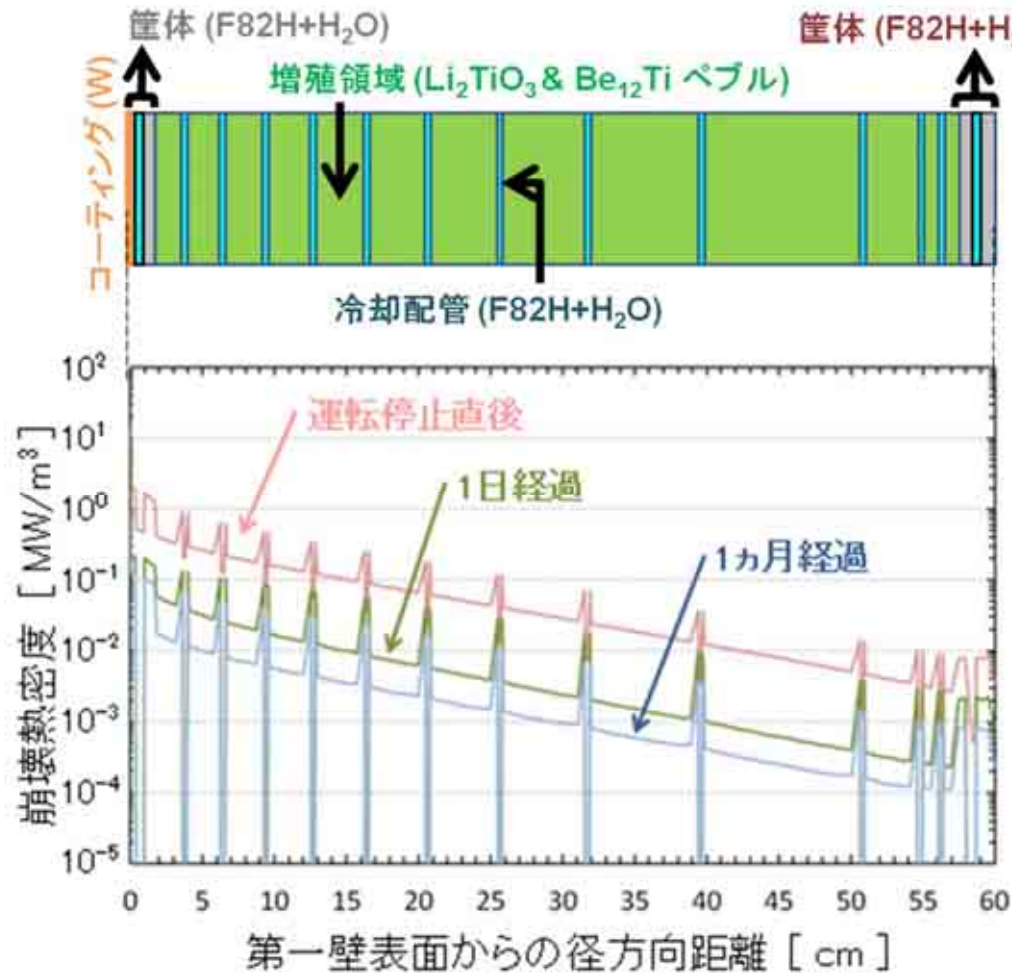


核融合出力に対する割合 1.8% 0.38% 0.1%

- **ブランケット: 第一壁 (F82H)**  
⇒ 主要核種:  $^{56}\text{Mn}$  (2.58時間)
- **ダイバータ: モノブロック (W)**  
⇒ 主要核種:  $^{187}\text{W}$  (1日)

# 核融合炉の崩壊熱(2)

(崩壊熱密度について)



・核融合炉停止後の**全崩壊熱**は核融合出力に比例

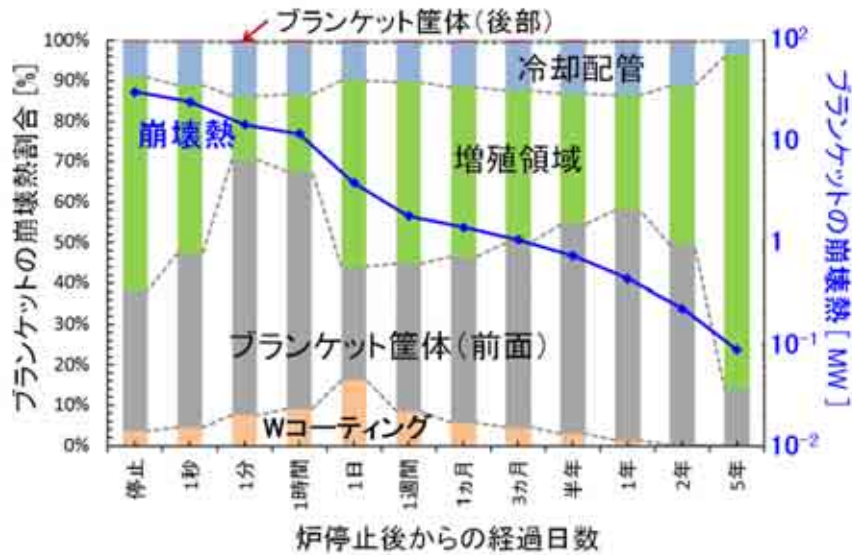
・単位体積当たりの**崩壊熱**は中性子フラックスに比例する。

・構造材の**温度上昇**は中性子フラックスに大きく依存

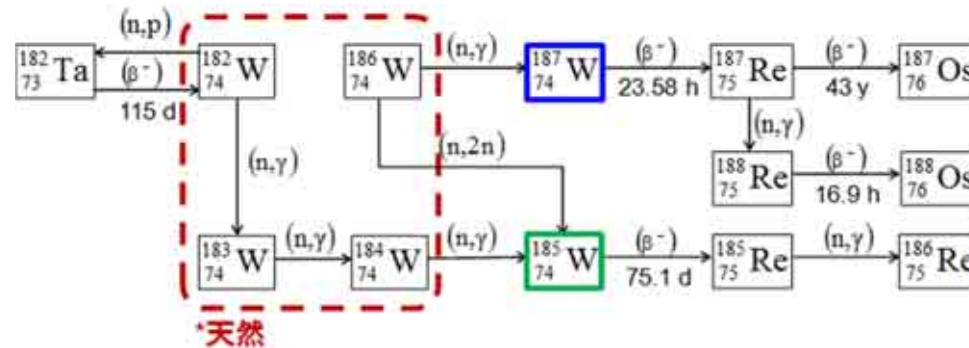
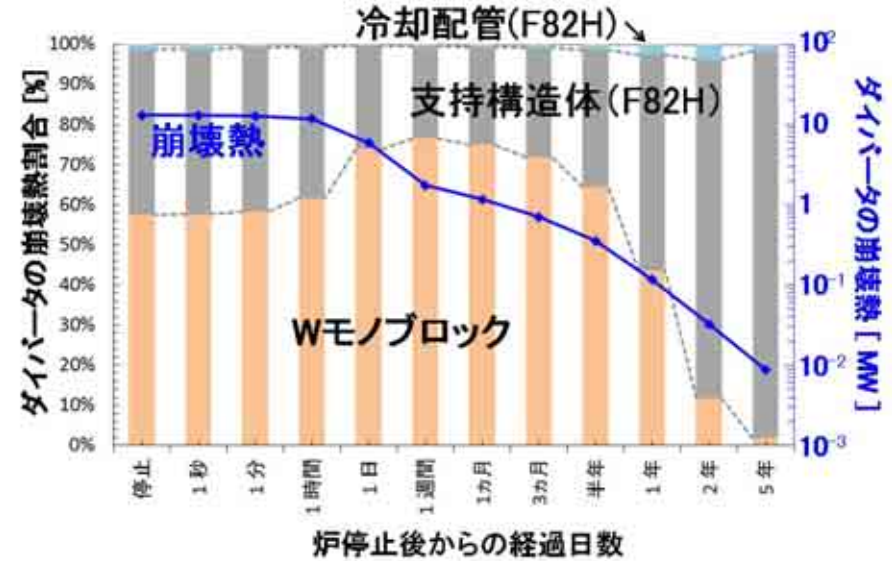
# 核融合炉の崩壊熱(3)

## (崩壊熱の主要構造物について)

ブランケット部  
(タングステン:0.2mm)

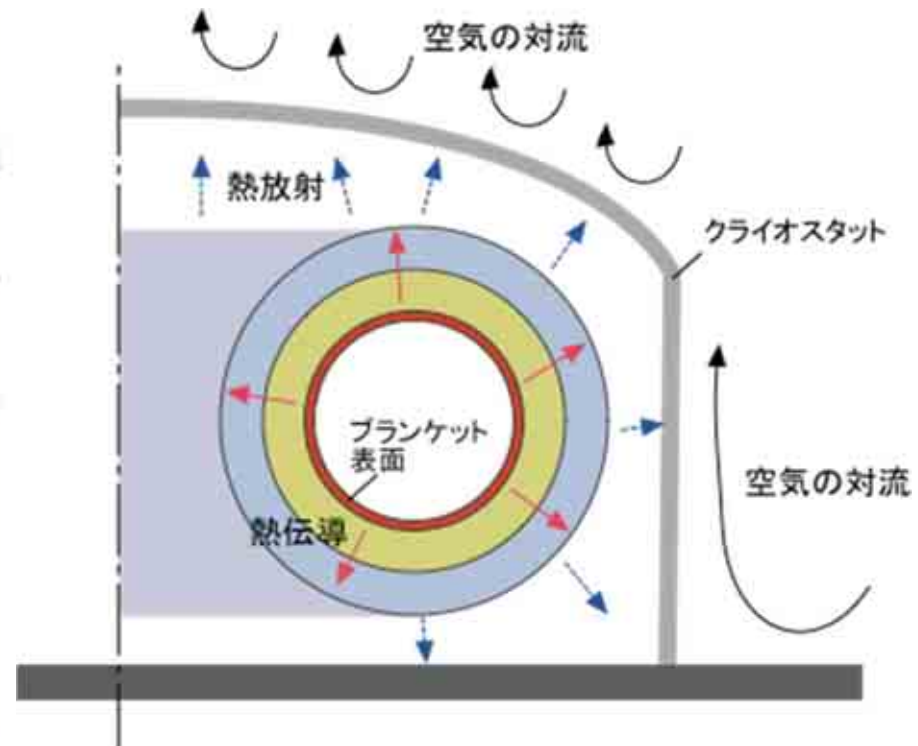
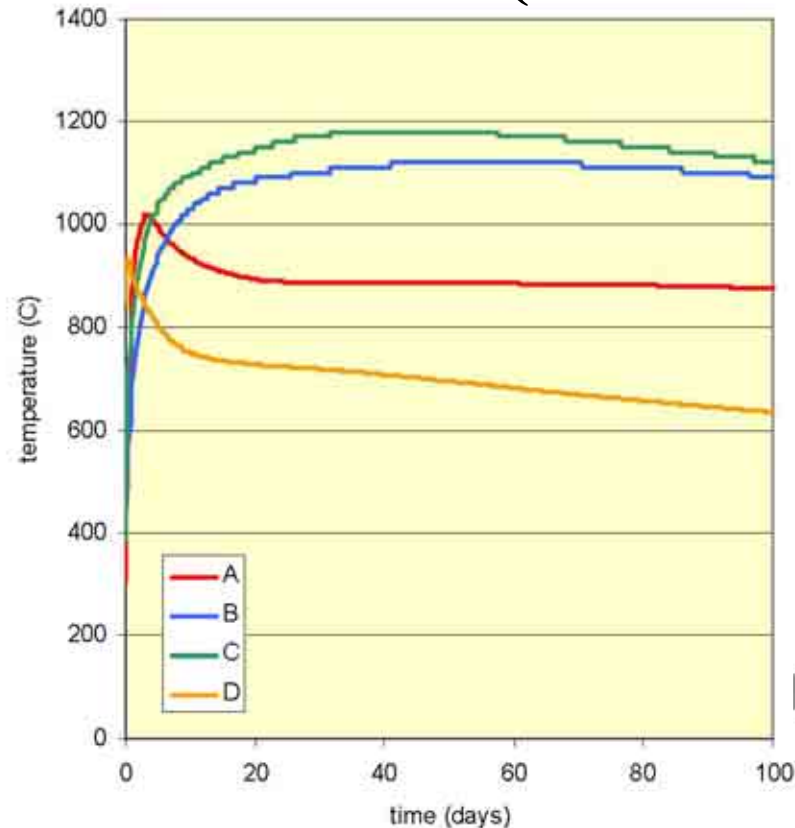


ダイバータ部  
(タングステン:21mm)





# 冷却機能喪失時の炉心の温度上昇解析 (EU-DEMOの計算例)

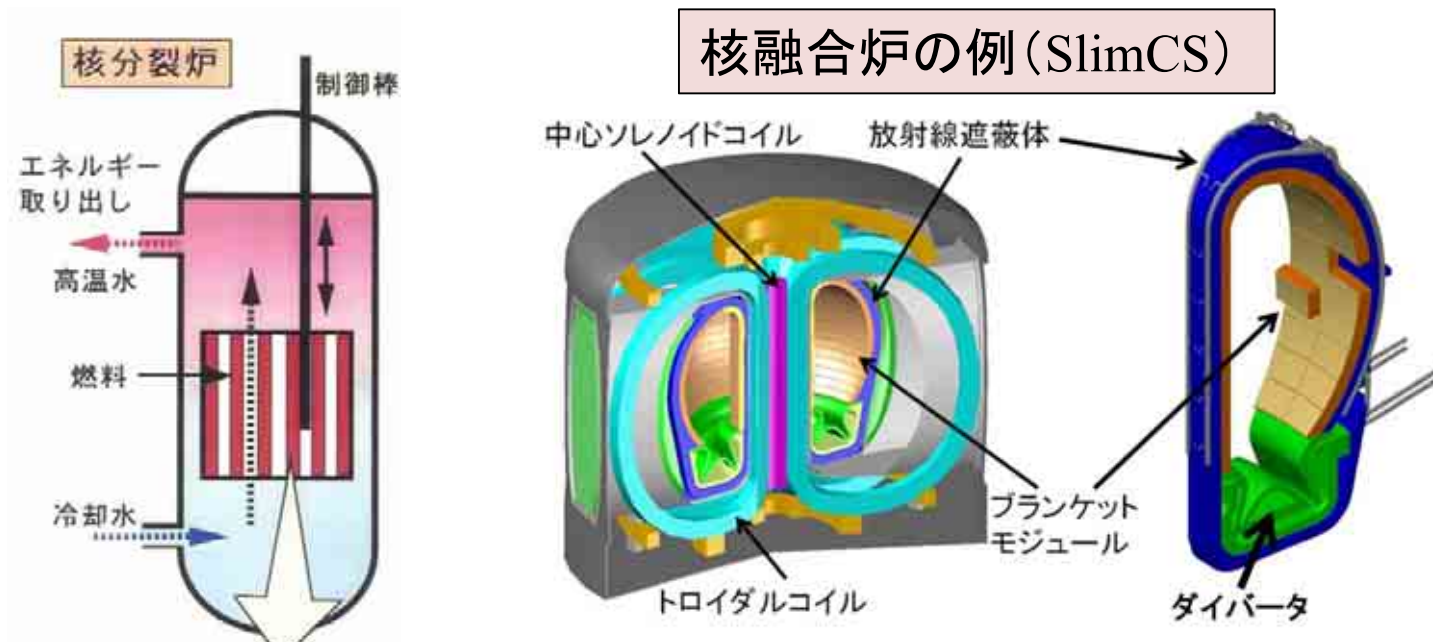


- EU炉では、中性子フラックスを下げて( $\sim 2 \text{ MW/m}^2$ )  
ブランケットの溶融が起こらない設計を目指している

参考文献: A conceptual study of commercial fusion power plants – Final report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS), EFDA-RP-RE-5.0 (Sept., 2004)



# 核融合炉の崩壊熱と安全性確保の方針



- 核発熱率が高い領域はプラズマ対向部分に限定
- プラズマ対向部分から真空容器の外側まで伝熱の経路が存在
- 真空容器、超電導磁石、支持構造などの大きな熱容量

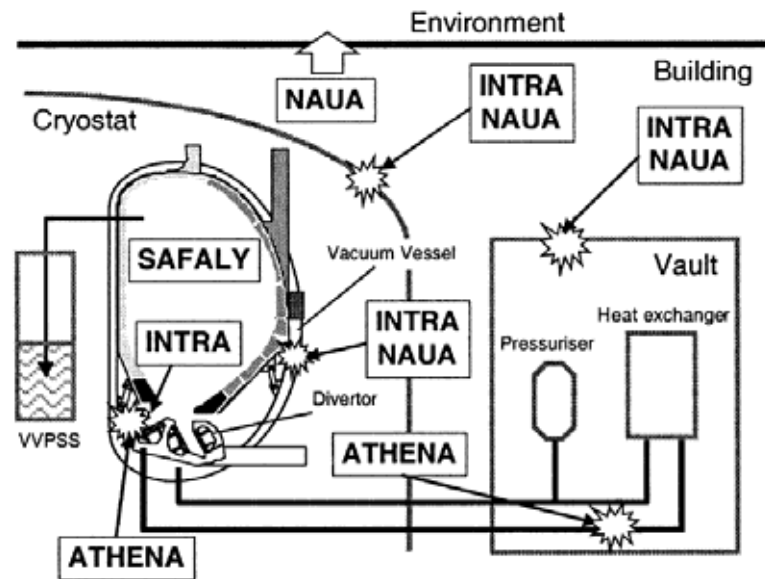


- 設計上の工夫により、冷却材喪失時にも真空容器の健全性を維持できる可能性が高い
- 炉内機器の健全性確保も財産保全の観点から重要

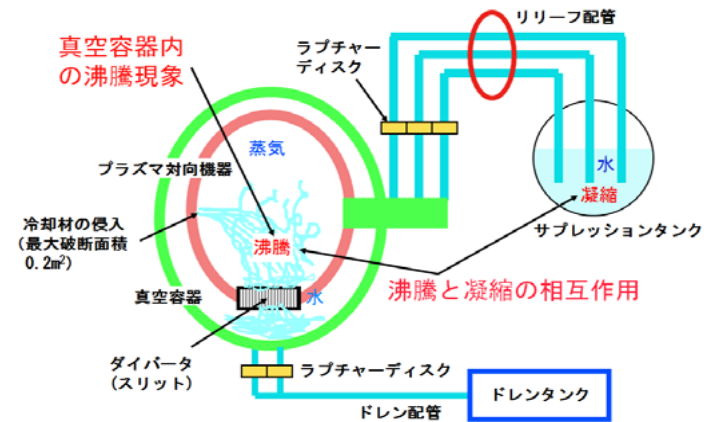
# 安全性の研究

Validation & Verification (V&V)実験  
による検証

## 安全解析コードの拡充



総合安全評価システムコード ISASに含まれる  
安全解析コード群



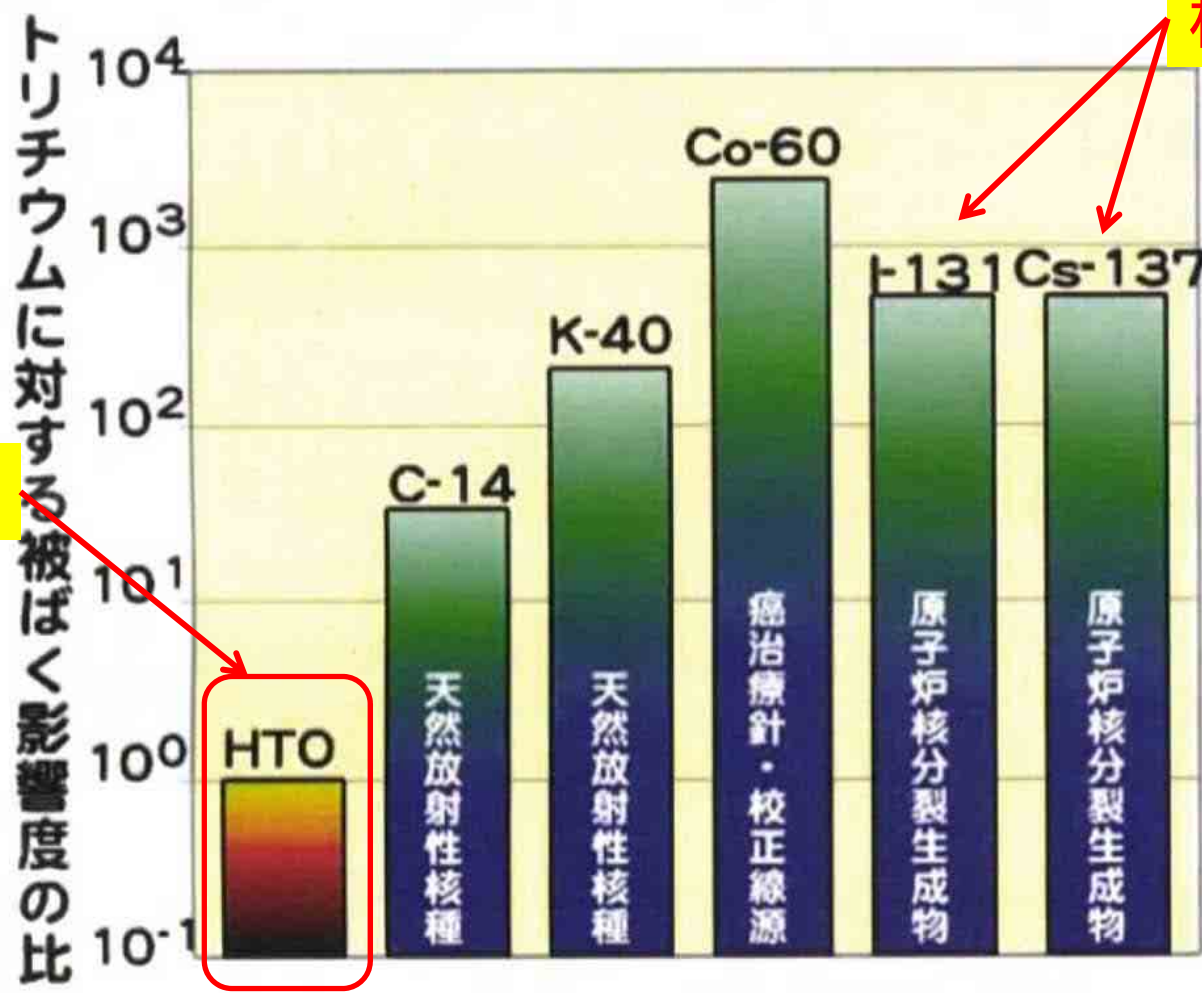
ICE(Ingress of Coolant Event):冷却水噴出事象に  
おける圧力制御システムとJAEAでの実験装置

# 各種放射性物質の影響度の比較

核分裂生成物

トリチウム

T:  $\beta$ 線  
18.6keV



I-131  
606keV  $\beta$ 線  
364keV  $\gamma$ 線

Cs-137  
512keV  $\beta$ 線  
662keV  $\gamma$ 線

1 Bq吸入時の影響

「ICRP Pub.72(1996)の実効線量係数」に基づいている

# 安全性と安心感

「安全性」: 安全の確保

「安心感」: 潜在的なハザード

	核融合プラント トリチウム (4.5kg)	軽水炉ヨウ素 131 (等価)
放射線の種類	18.6 keVのベータ線	610 keVのベータ線
放射能(A)	$1.7 \times 10^{18}$ Bq	$5.4 \times 10^{18}$ Bq
大気中濃度限界(B)	5000 (Bq/m <sup>3</sup> )	10 (Bq/m <sup>3</sup> )
潜在的放射線リスク指数 (=A/B)	$3.5 \times 10^{14}$ m <sup>3</sup>	$5.4 \times 10^{17}$ m <sup>3</sup>
潜在的放射線リスク指数 の相対比	<b>1/1500</b>	<b>1</b>
	核融合会議開発戦略検討分科会の報告書より	
INES (国際原子力事象評価尺度)	<b>1/150</b>	<b>1</b>

=> ~1/3

=> ~1/500

ヨウ素等価  
増倍係数(B)

公衆 ~ 1/50

# INES (国際原子力事象評価尺度) 評価の指針

[\*] INES, “The international nuclear and radiological event scale user’s manual 2008 edition”, Appendix-I, IAEA Vienna (2009).

	被爆者	被曝形態	呼吸率 $R_{br}$	線量係数
施設外	公衆	内部被曝 (公衆, 呼吸 + 外部被曝)	1.2 m <sup>3</sup> /h	成人の最大値
施設内	作業者	内部被曝 (作業者, 呼吸)	軽作業	成人の代表値

## ○クリアランスタイプ: 呼吸気道(肺)から体液への移行速度

粒子状のものについては, (F, M, S)の3つに分類される [ICRP68(32項)].

粒子状のトリチウム化合物はこちらに分類される.

## ○ガス状および蒸気のもの,

- クラスSR-1: 可溶性または反応性 -- 一定割合取り込まれる
- クラスSR-2: 非常に可溶性または反応性 -- 瞬時に全身に取り込まれる
- クラスSR-0: 不活性かつ非反応性

HTガスはSR-1, HTO水, OBTガスはSR-2に分類.

## ○臓器移行係数: $f_1$ 胃腸管からの取り込み割合

この係数は経口摂取について与えられているものであるが, 吸入摂取の場合にも, 呼吸器からのクリアランスの後で胃腸管を通過する物質については考慮しなければならない. この場合, ICRP30 or 67, 69のうち最新のものをつかう [ICRP 68(27項)].

# 作業者のトリチウムのヨウ素等価増倍係数1/500の根拠

表4 線量係数の比較 (作業者) [ICRP 68]

	推奨値	粒子状呼吸	粒子状呼吸	経口	ガス状呼吸			
RI	Type	Adult (inh 1 $\mu$ m)	Adult (inh 5 $\mu$ m)	Adult (ing)	SR-1,2 Inh		INES	1 digit
H-3 gas	SR-1				1.8E-15	1.80E-15	1.64E-07	2.E-07
HTO	SR-2			1.8E-11	1.8E-11	1.80E-11	1.64E-03	0.002
OBT	SR-2			4.2E-11	4.1E-11	4.10E-11	3.73E-03	0.004
I-131 vapor	F				2.0E-08	2.00E-08	1.82E+00	2
I-131	F	7.60E-09	1.10E-08	2.2E-08		1.10E-08	1.00E+00	1
Cs-137	F	4.80E-09	6.70E-09	1.3E-08		6.70E-09	6.09E-01	0.6

# 公衆被曝:ヨウ素等価増倍係数1/50 (INES)の根拠

INESでトリチウムのヨウ素等価増倍係数が1/50となっている計算の根拠は以下。

1/50

核種	外部被ばく[1]		内部被ばく(公衆)[2]		合計線量 Sv/(Bq s m <sup>-3</sup> )	ヨウ素等価 増倍係数
	Dgrad e(50) Sv/(Bq m <sup>-2</sup> )	Dgrad x Vg Sv/(Bq s m <sup>-3</sup> )	Dinh Sv/Bq	Dinh x 呼吸量 Sv/(Bq s m <sup>-3</sup> )		
<b>H-3</b>	0	0	2.60E-10	8.58E-14	8.58E-14	<b>0.02</b>
<b>I-131</b>	2.70e-10	2.70E-12	7.40E-09	2.44E-12	5.14E-12	1
<b>Cs-137</b>	1.30E-07	1.95E-10	3.90E-08	1.29E-11	2.08E-10	40

Vg: 吸着速度(ヨウ素1.0E-02 m/s, その他1.5E-03 m/s), 呼吸量 3.3E-04 m<sup>3</sup>/s[ICRP 71], 標準的な大人(179 cm, 73 kg)[ICRP 23]について評価

## 呼吸による内部被曝の実効線量係数(Dir h)[2]

移行速度		Fast		Medium		Slow		大人の 最大値
核種	型	幼児	大人	幼児	大人	幼児	大人	
<b>H-3</b>	<b>M</b>	2.60E-11	6.20E-12	3.40E-10	<b>4.50E-11</b>	1.20E-09	2.60E-10	<b>2.60E-10</b>
<b>I-131</b>	F	7.20E-08	<b>7.40E-09</b>	2.20E-08	2.40E-09	8.80E-09	1.60E-09	7.40E-09
<b>Cs-137</b>	F	8.80E-09	4.60E-09	3.60E-08	9.70E-09	1.10E-07	<b>3.90E-08</b>	3.90E-08

[1] IAEA, "Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency", [IAEA-TECDOC-1162], Section E Table 15(2000).

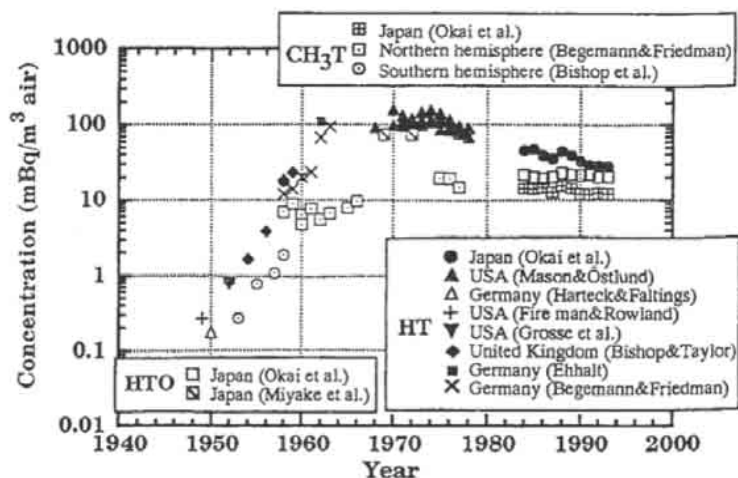
[2] "Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4 Inhalation Dose Coefficients, " (1995)



# 環境における挙動(大気中/雨水中)

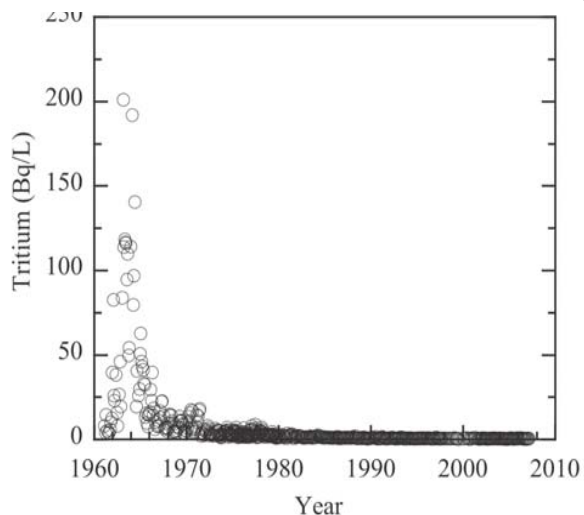
## 大気中トリチウム濃度の変遷(1)

(一政祐輔他, 日本原子力学会誌, 39, 914 (1997).)



## 雨水中トリチウム濃度の変遷

N. Momoshima, J. Plasma Fusion Res., 85, 426 (2009).

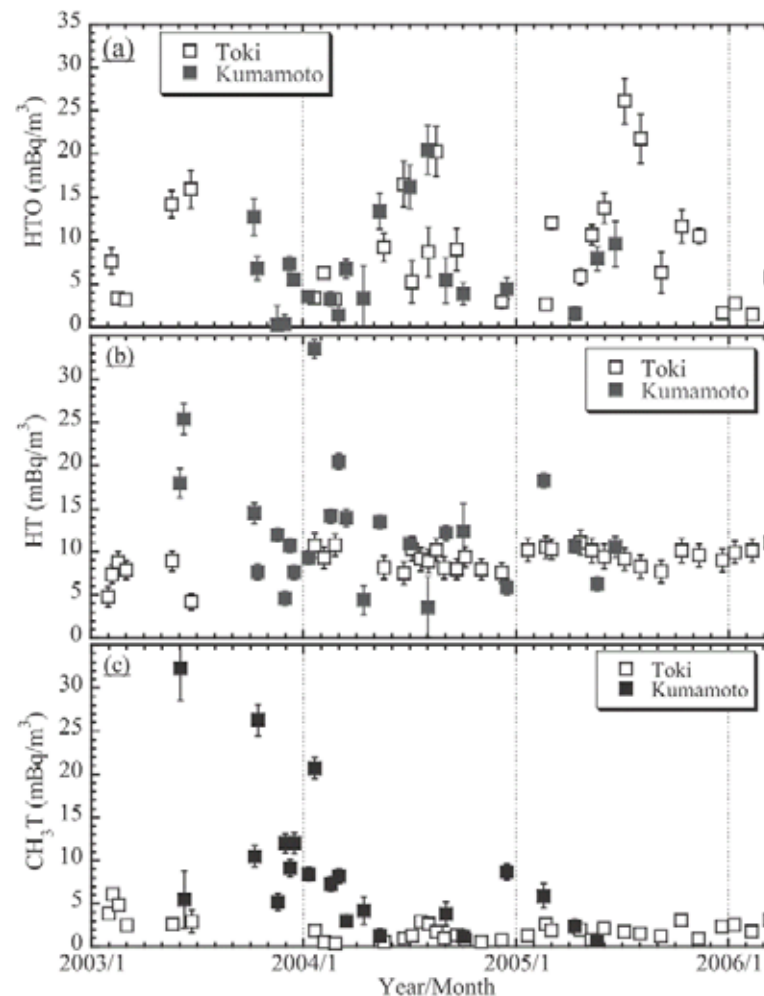


## 大気中トリチウム濃度の変遷(2)

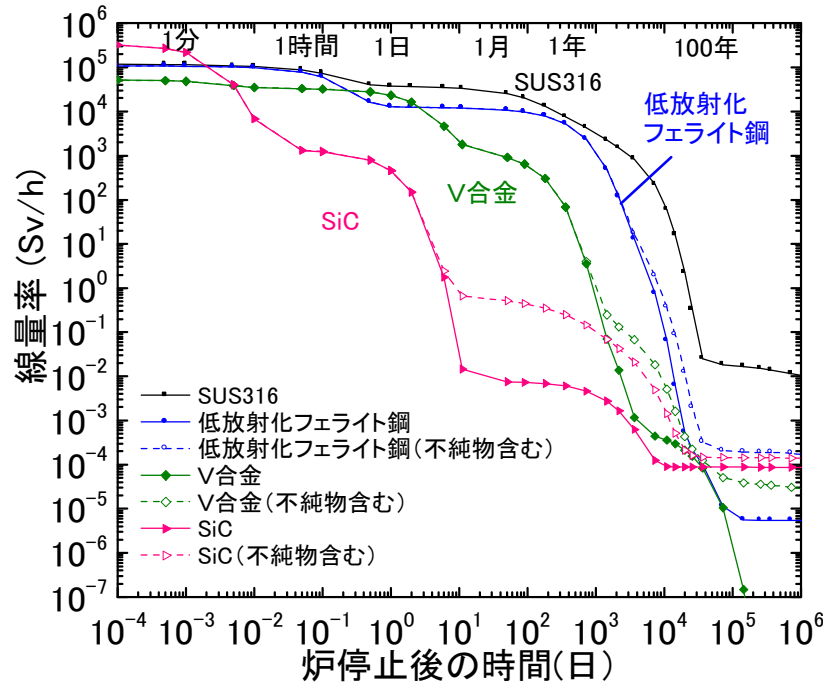
(土岐と熊本での測定)

N. Momoshima, et al., J. Nucl. Radiochem. Sci., 8, 117 (2007).

T. Uda, et al., Fusion Sci. Technol., 54, 281 (2008).

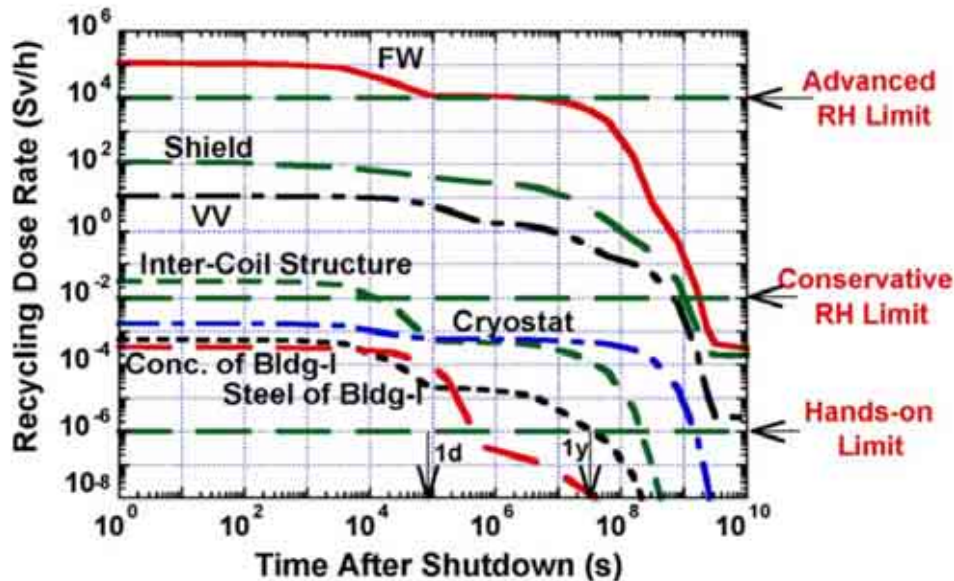


# 核融合炉の放射性廃棄物



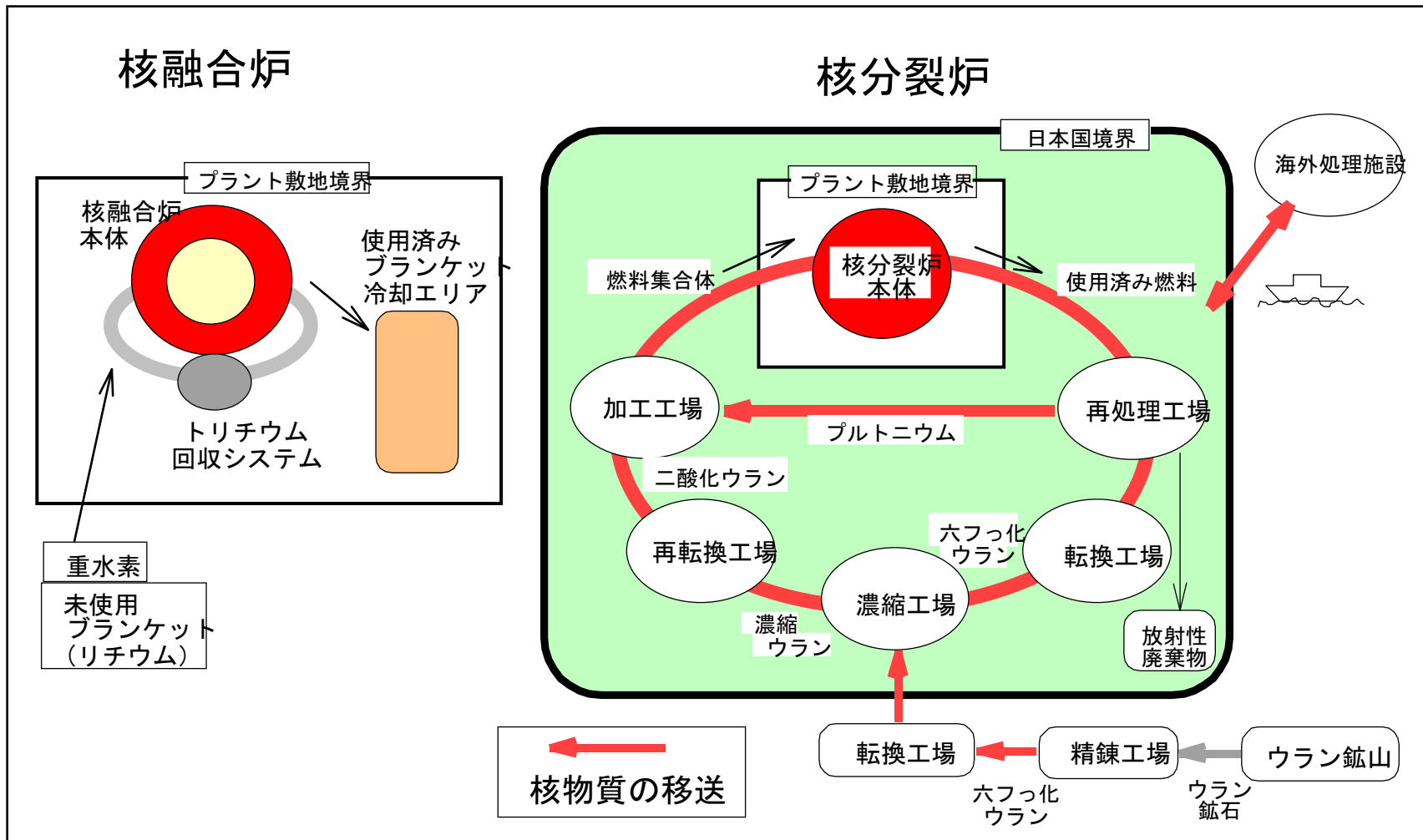
核融合炉用低放射化材料の運転停止後の線量率減衰

(ブランケット第一壁、中性子壁負荷 $2\text{MW}/\text{m}^2$   
5年使用後。誘導放射能計算コードEASY-2005  
を用いて算出。)



運転停止後の各コンポーネントのガンマ線線量率の減衰  
(米国ARIES-CS設計)

# 燃料サイクル



# 核融合炉の利点

## 「量的なメリット」

- @ 平均的な崩壊熱密度が低い
- @ 放射能レベルが低い

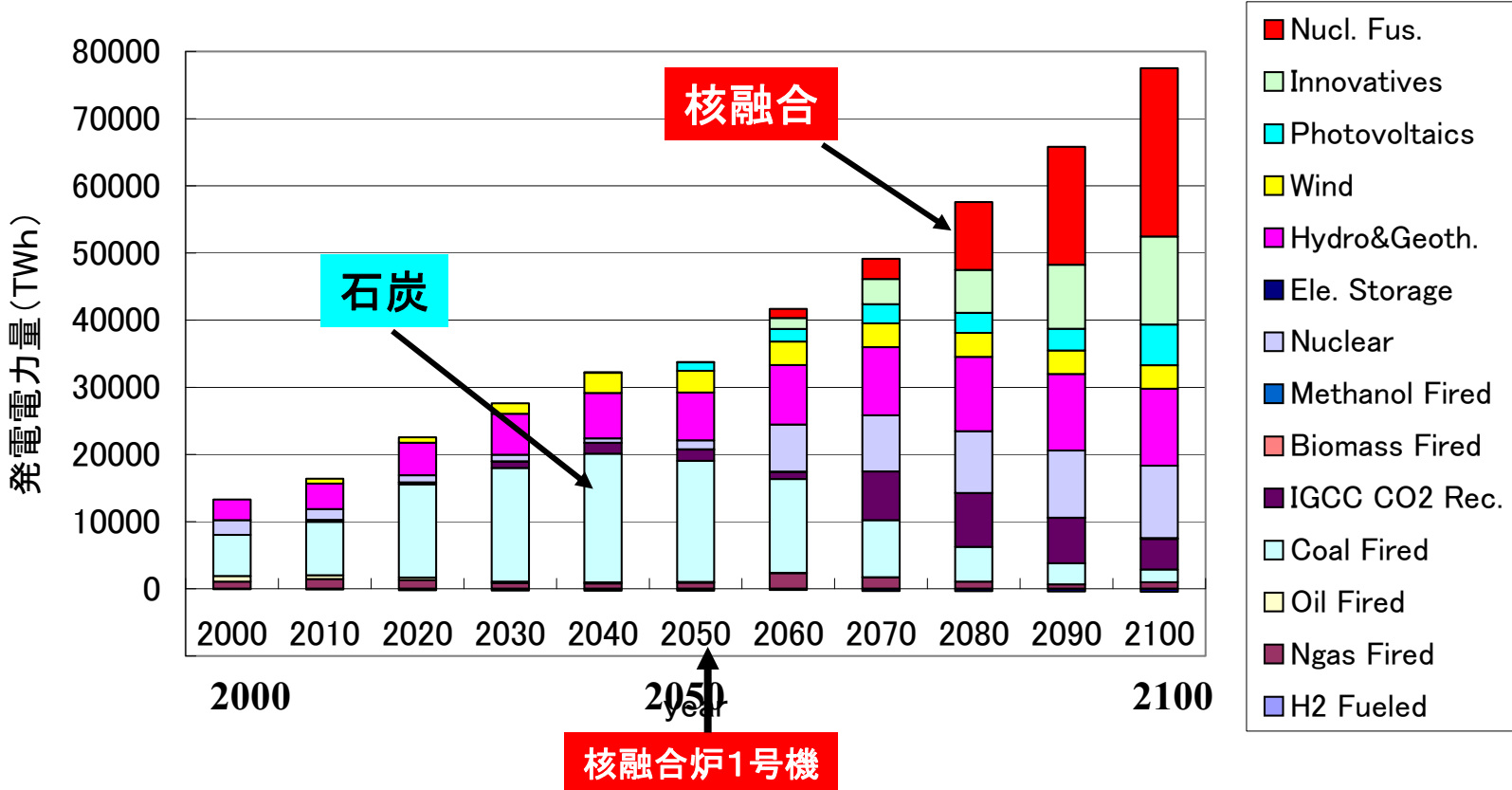
## 「質的なメリット」

- @ 核暴走はない
- @ 高レベル放射性廃棄物が無い
- @ 核拡散に対する抵抗性が高い

# 21世紀における核融合エネルギー導入の可能性

K. Tokimatsu, et al., 第18回 IAEA核融合エネルギー国際会議 (2000年10月)

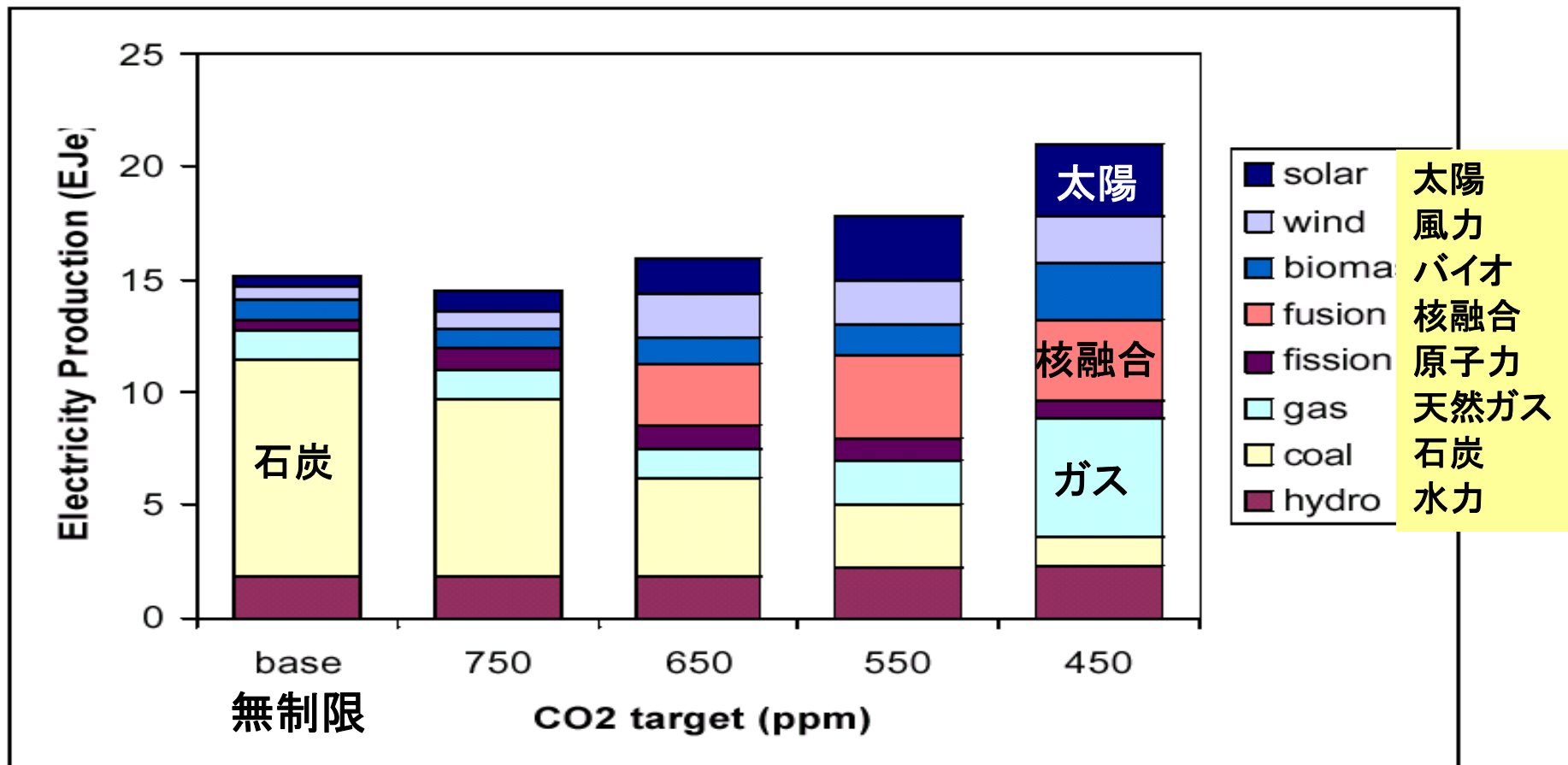
最大建設可能速度制約ケース、導入時点2050年 (550ppm濃度制約)  
 -導入初年度発電コスト66mill/kWhまで下げる必要がある-



== > 21世紀後半の環境問題に対して核融合が有為な貢献を果たすためには、核融合炉の21世紀中葉での実用化が必要

# CO2排出量制限とエネルギー供給源

(ヨーロッパの解析結果)





# ○永遠のエネルギーを目指して

## 2 1世紀の地球環境に調和するエネルギーの開発

### ●優れた環境性

地球の温暖化の原因となる二酸化炭素などの発生が少ない。  
 廃棄物の放射能の量は比較的短い期間ですみやかに減少する。

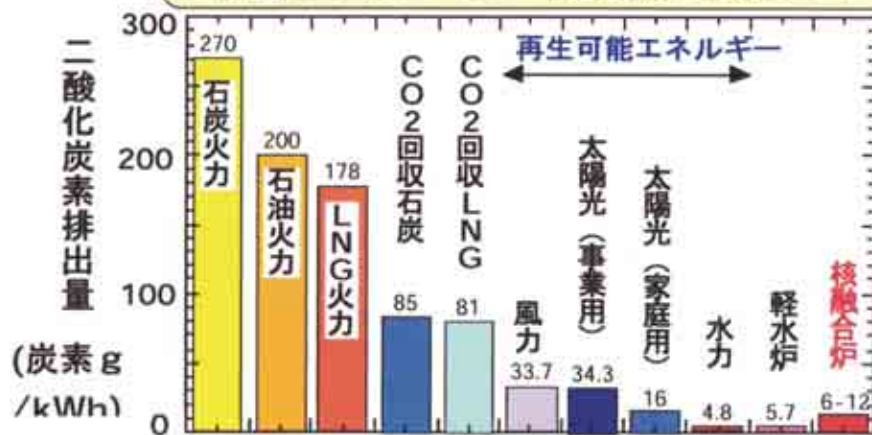
### ●高い安全性

核的暴走がない。  
 崩壊熱密度が小さい。

### ●豊富な資源

重水素は、海水中に豊富に存在。  
 三重水素は、埋蔵量の多いリチウムより生成可能。

発電システムの二酸化炭素排出率



出典：電力中央研究所報告Y94009  
 核融合炉は東大(IAEA-TCM98)

### 核融合炉の利点

