

加速器施設等の解体に伴い 発生する廃棄物に対する クリアランスについて (検討状況 その1)

日本原子力研究所、高エネルギー加速器研究機構

平成17年3月28日

背 景

背景：

- 1) 原子炉施設等（原子炉等規正法）においては、クリアランスレベル検認手順がほぼ確立し、本年中にクリアランス制度の法制化が予定されている。
- 2) 大型の加速器施設の廃止措置が近々予定されており、これに伴い極めて放射能濃度が低いクリアランス可能と思われる廃棄物が多量に発生する。
- 3) そこで、加速器施設等に対するクリアランスレベル検認について、技術的課題を検討し、合理的検認が可能か検証する必要がある。

目的及び検討方針

目的：

加速器施設等の廃止措置に伴い発生する廃棄物の中には、極めて放射能濃度が低いクリアランス可能と思われるものがある。このような廃棄物に対してクリアランス制度の導入が可能であることを明らかにする。

検討の方針：

- 1)既に検討が進んでいる原子炉施設に対するクリアランスレベル検認手順をベースとする。
- 2)加速器施設等の特性を考慮して、同施設固有の課題を明らかにする。

注) クリアランスレベルにはRS-G-1.7を適用

主な課題と対応

課題1：施設特性の把握

加速器の種類、核反応、対象物の元素組成調査

課題2：測定による放射能濃度評価

核種組成と濃度分布

課題3：計算による放射能濃度評価

核種組成と濃度分布

多種の核反応を考慮

課題4：核種組成比の誤差評価

クリアランスレベル検認の判断方法検討

原研の加速器施設等一覧

No.	施設名	名称	形式・線質	エネルギー (MeV) 電 流 (mA)	目的	設置年月	線量率 (Gy/sec)	所在地
1	自由電子レーザー施設	FEL	500MHz 超電導線型加速器を用いた 自由電子レーザー	電子: 10 ~ 20MeV 準平均4mA/10 ~ 20A 尖頭値: 40ps 全平均40 μ A	自由電子レーザーの研究	平5.7	光出力 1kW平均	東海研
2		2MeV バンデグラフ	バンデグラフ型 軽イオン及び特殊な重イオン	2 0.025(陽子) 0.010(窒素)	物性物理材料の基礎研究	昭32.5 平15.3廃止		東海研
3		5.5MeV パデグラフ	バンデグラフ型 軽イオン	5.5 2.5(ハルスのビーク値)	原子核物理、中性子物理、強力なパ ルス化中性子源の利用が可能	昭37.9 昭63.8廃止	~ 10 ⁸ n/sec (毎秒発生す る中性子数)	東海研
4	リニアック建家	120MeVリニアック	電子加速器	120 (500mA)	中性子断面積測定等	昭47.8 平6.9廃止		東海研
5	タンデム加速器建家	タンデム加速器	折り返しタンデムバンデグラフ 型 軽イオン及び重イオン	陽子: 5 ~ 40(3 μ A) 沃度イオン: 70 ~ 280) (1p μ A)	材料、物理、核物理、核化学、中性 子物理等の研究			東海研
6	核融合中性子施設	FNS	重陽子加速器	0.4 ビーム電流: 23mA	核融合中性子工学の研究	昭56.4	5 \times 10 ²	東海研
7	陽子加速器開発室		陽子加速器		大強度加速器の開発	平12.3		東海研
8	1号加速器棟	1号加速器	コックロフト型 電子線	2 30	放射線利用の研究開発及び普及	昭56.2	1 \times 10 ⁶	高崎研
9	2号加速器棟	2号加速器	カスケード型 電子線	3 25	放射線利用の研究開発及び普及	昭53.3	1 \times 10 ⁶	高崎研
10		AVF サイクロトン	AVF型サイクロトン 軽イオン及び重イオン	陽子: 90(10 μ A) アルゴン: 175(5 μ A) キセノン: 450(0.2 μ A) 金: 500(0.02 μ A)		平3.10		高崎研
11	イオン照射研究施設 (TIARA)	3MV タンデム加速器	バンデグラフ型 (ベレットチェーン) 軽イオン及び重イオン	陽子: 6(5 μ A) ニッケル: 15(5 μ A)	宇宙環境材料、核融合炉材料、パイ オ技術及び新機能材料の研究開発	平3.3		高崎研
12		3MV シングルエンド加速器	コックロフト型 (シュンケル回路) 軽イオン	陽子: 3(100 μ A) ヘリウム: 3(70 μ A) 電子: 3(50 μ A)		平5.7		高崎研
13		400kV イオン注入装置	コックロフト型 軽イオン及び重イオン	アルゴン: 0.4(50 μ A) リン: 0.4(30 μ A) 銀: 0.4(4 μ A)		平5.7		高崎研
14	線形加速器棟	線型加速器	電子加速器	電子: 1.2GeV 陽電子: 0.9GeV	電子を加速し、シンクロトロンに射出			関西研
15	シンクロトン棟	シンクロトン	直線加速器、シンクロトン、 蓄積リング	電子: 8Gev	放射科学研究	平9.10		関西研
16	むつ 研究棟 (タンデトロン)	タンデトロン			放射性核種の移行挙動の調査研究	昭47.7		むつ
17	那珂研 JT-60施設・実験棟	JT-60			核融合研究	昭58.7		那珂研

これまでの検討状況

原研で放射化が予想される加速器施設等を選択 放射能測定と放射化計算の実施

- 1) 評価対象施設（10MeV以上の施設で放射化が予想される主な原研施設）
イオン加速器：タンデム、FNS、TIARA
電子加速器：リニアック
- 2) 評価材料：コンクリート、金属
- 3) 放射化計算：
利用可能な既存の入力データ及び計算コード（DCHAIN - SP2001：
20MeV以下の中性子による放射化を評価可能）を用いて試算
（元素組成等については、NUREG-CR-3474値を使用しており、今後材料の元素分析などの
確認を進める。）
- 4) 放射能測定：関連施設のコンクリートを対象（金属は測定継続中）
測定器：Ge半導体検出器による核種測定
測定時間：10,000秒（環境試料測定条件と同様、一部50,000秒）

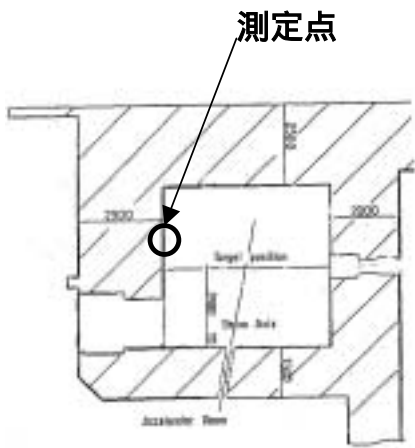
（*本資料の計算値及び数値は、現段階での暫定値である。）

放射化計算条件

加速器		照射条件		運転履歴
		線源スペクトル	中性子源強度(n/s)	
タンデム照射室		^{181}Ta と $^{238}\text{U}^{12}\text{C}$ からの発生スペクトル角度毎にスペクトル形状を設定(～2MeV)	6.85×10^{11}	予想運転時間の1,200時間/年を平均化、年間で連続して稼動
FNS	第1ターゲット室	全方位を合計したスペクトルで等方放出	3.0×10^{11}	運転出力は直流(2mA)とパルス(0.2mA)の2種類とし、運転時間は各年度末に一括で稼動
	第2ターゲット室	0度方向のスペクトルで等方放出	5.0×10^{12}	
LINACターゲット室(Tc)		Tcターゲット室スペクトルで等方放出(～1MeV)	3.0×10^{14}	運転出力は50 μA とし、運転時間は各年度末に一括で稼動
TIARA	第1軽イオン室	陽子(68MeV)、銅ターゲットからの発生スペクトル 角度毎にスペクトル形状を設定(0～10MeV最多)	8.0×10^{12}	2003年度の運転履歴から年間の平均出力を算出。運転時間は各年度末に一括で稼動
	第2軽イオン室		8.0×10^{11}	
	第3軽イオン室			

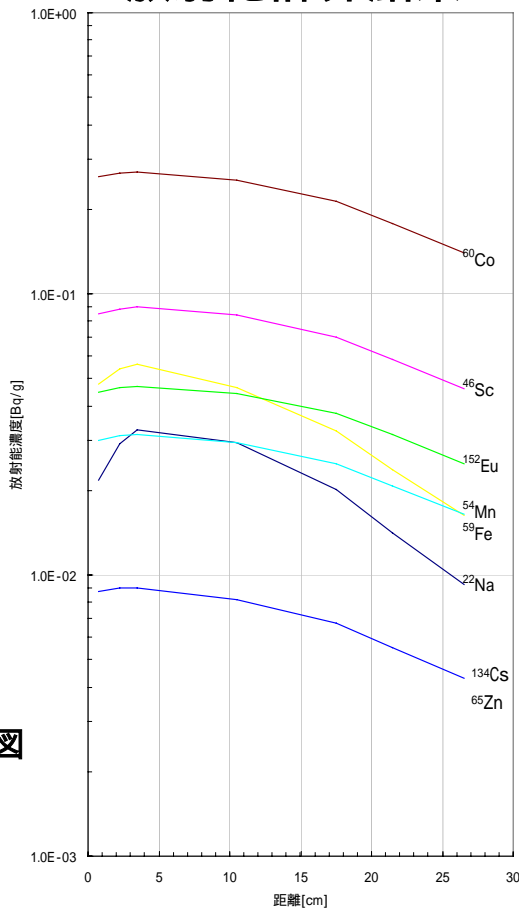
主な使用計算コード: ANISN(断面積縮約)、TORT(X,Y,Z中性子束計算)、DCHAIN-SP2001(放射化計算)

放射化計算(暫定値)及び測定結果-1 例:コンクリート

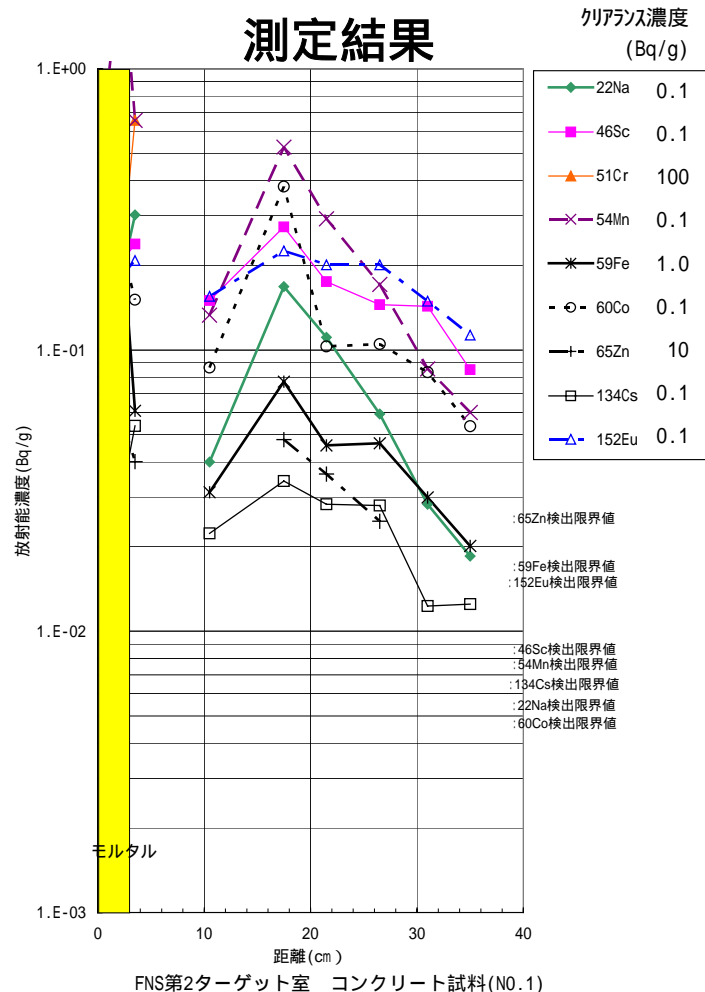


FNS第2ターゲット室 平面図

放射化計算結果



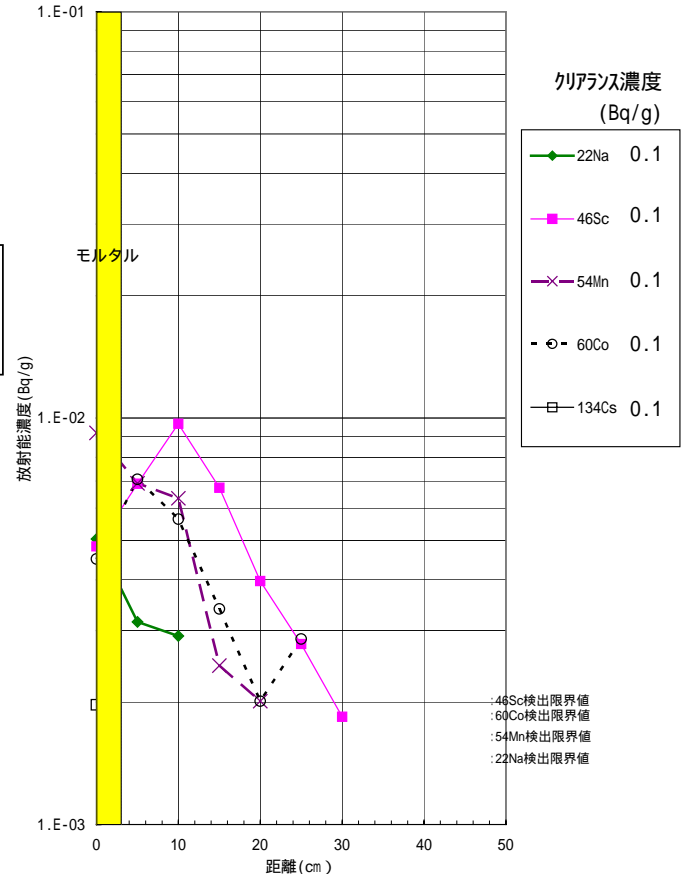
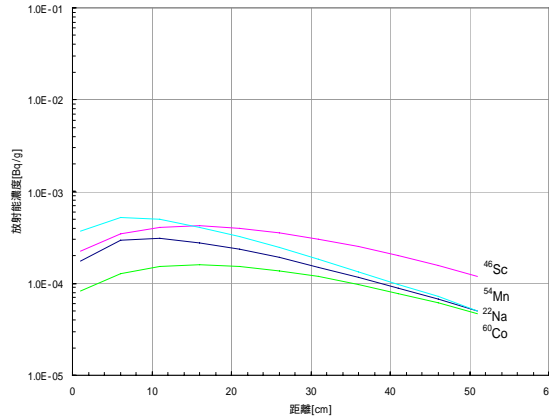
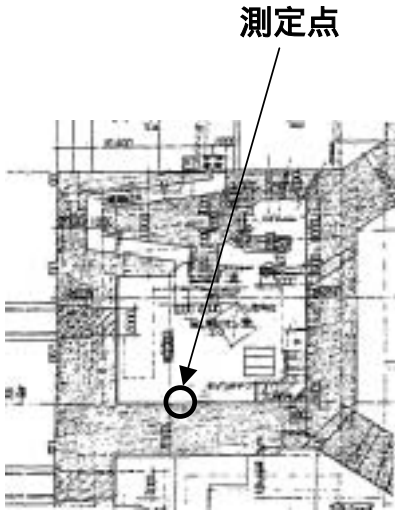
測定結果



放射化計算(暫定値)及び測定結果-2 例:コンクリート

放射化計算結果

測定結果

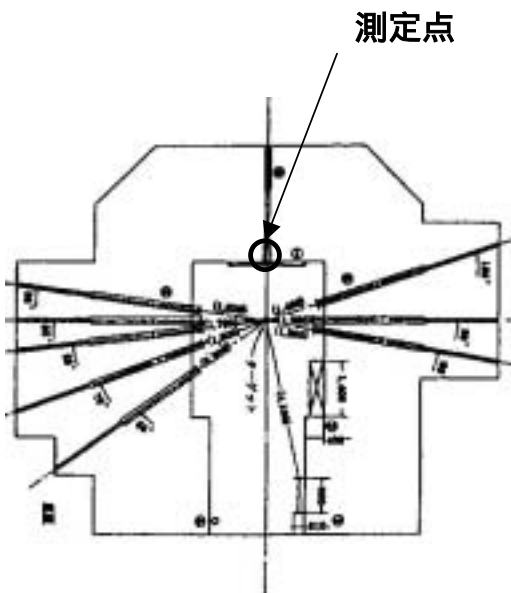


第1軽イオン室平面図

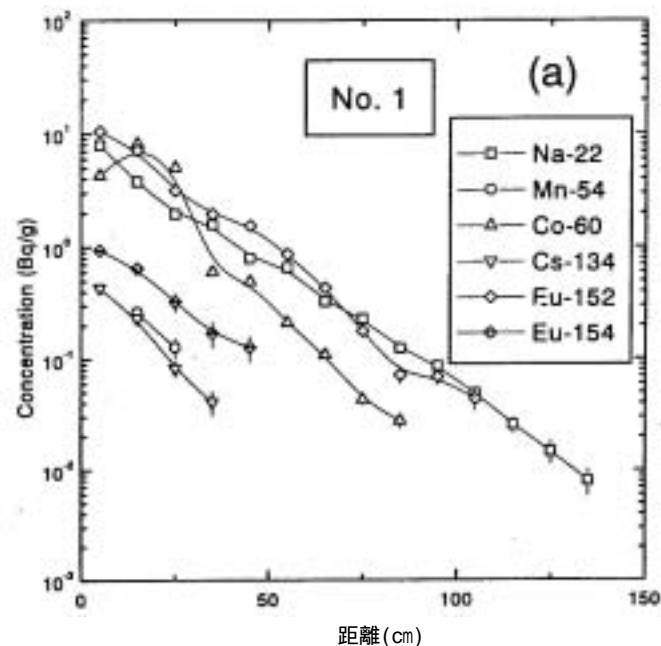
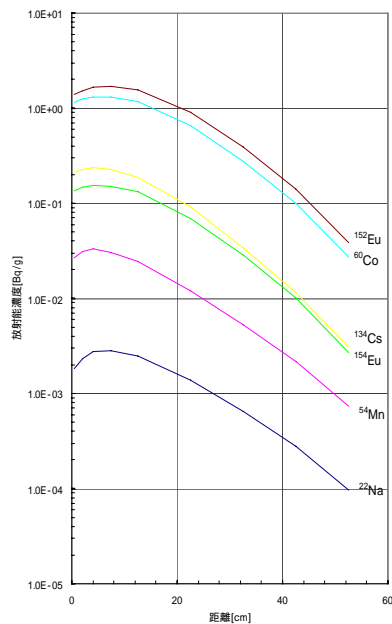
放射化計算(暫定値)及び測定結果-3 例:コンクリート

放射化計算結果

測定結果

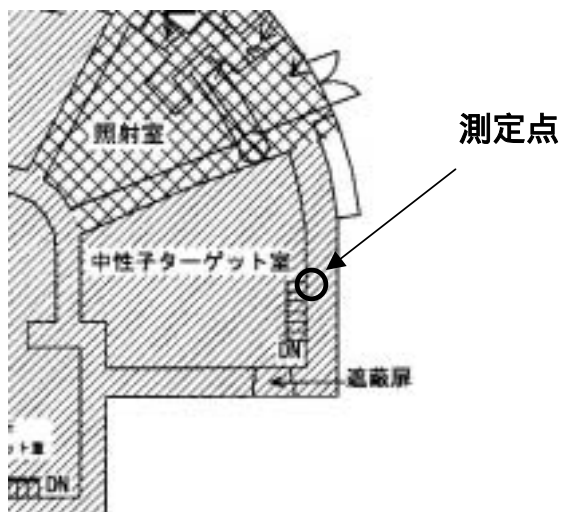


ターゲット室平面図



測定結果-4 例:コンクリート

測定結果



核種	放射能濃度(Bq/g)
^{22}Na	$< 7.2 \times 10^{-3}$ (ND)
^{54}Mn	$< 9.3 \times 10^{-3}$ (ND)
^{60}Co	$< 6.5 \times 10^{-3}$ (ND)
^{134}Cs	$< 5.2 \times 10^{-3}$ (ND)
^{152}Eu	$< 1.7 \times 10^{-2}$ (ND)

ND : 検出限界値以下

中性子ターゲット室平面図

放射化計算(暫定)と放射能測定の結果概要

放射能測定結果

- 1) 線放出核種が検出された施設：FNS、TIARA、リニアック
- 2) 線放出核種が検出されなかった施設：タンDEM

放射化計算値(暫定値)と放射能測定値の比較

- 1) FNS
 - 2) TIARA
 - 3) リニアック
- 被ばく評価に有意な値となる核種(Co-60, Mn-54, Eu-152)は概ね同等
- : ^{22}Na (一部光核反応で生成)を除く
核種組成が一致

理由； ^{22}Na については光核反応(γ, n)の放射化計算が必要 (H17年度実施)

JT-60における金属中の 放射化検出核種濃度

照射物：ステンレス、インコネル、高Mn鋼、鉄
 照射：2001年10月23日～11月9日
 中性子発生量： 1.5×10^{18} 個
 半減期：100日以上

JT-60における金属中の放射化検出核種濃度

材質	反応	核種	濃度(Bq/g)
ステンレス	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)$	^{60}Co	3×10^{-2}
	$^{54}\text{Fe}(n, p)$	^{54}Mn	8×10^{-3}
インコネル	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)$	^{60}Co	1×10^{-2}
高Mn鋼	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)$	^{60}Co	6×10^{-3}
	$^{54}\text{Fe}(n, p)$	^{54}Mn	2×10^{-2}
鉄	$^{54}\text{Fe}(n, p)$	^{54}Mn	6×10^{-3}

金属については、現在測定を継続中であり、今後測定データの収集整備を進める。

まとめ

検討結果

放射性核種濃度は、放射化計算で選定された核種を基に、放射能測定により十分確認することができる。

今後の進め方

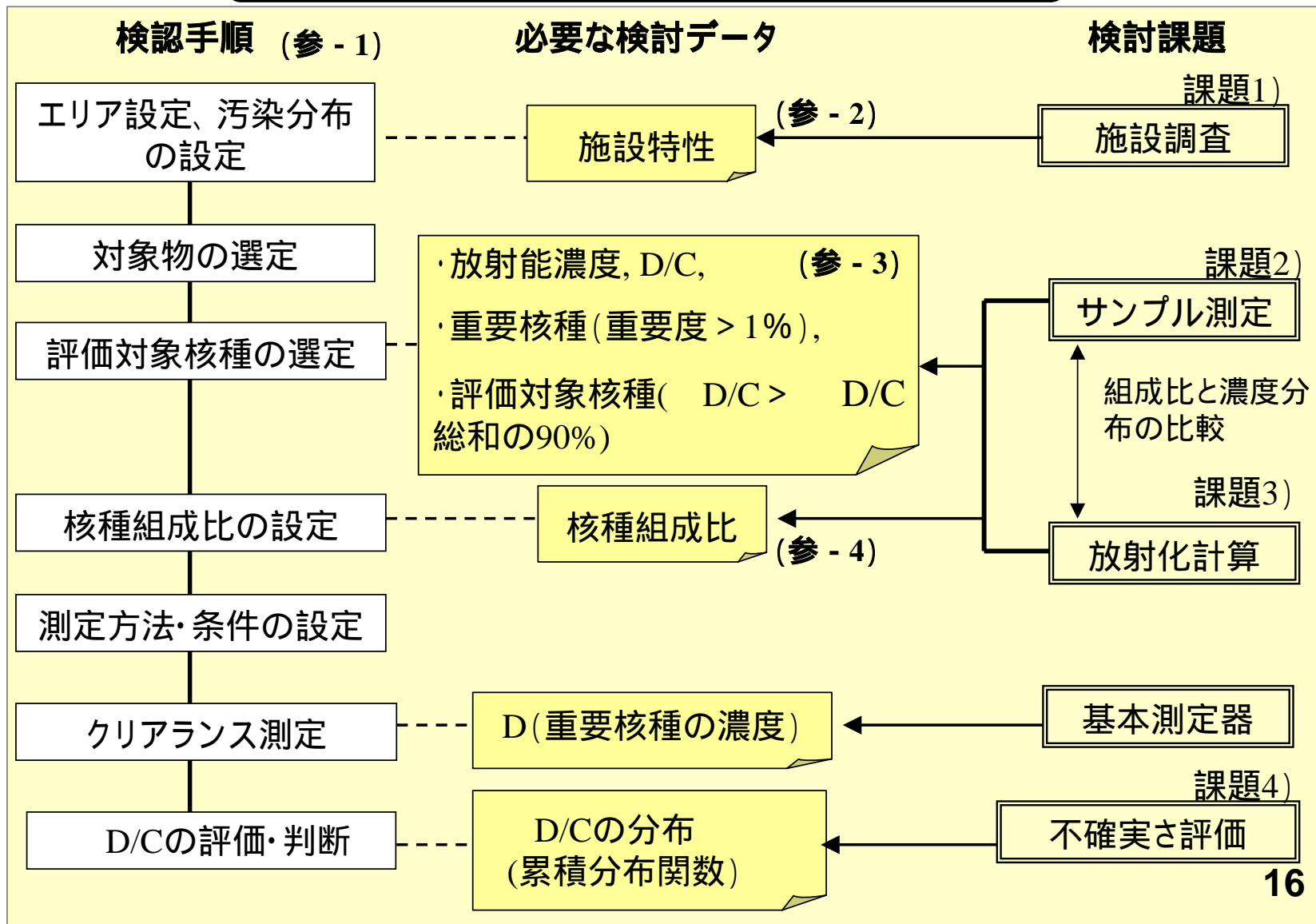
- 1) 放射化計算の更なる高精度化を進める為、対象物の材料毎の元素組成など詳細な情報を調査する。
- 2) 不確実さを考慮したクリアランス判断を行うため、核種組成比(SF)の分布を実測し、放射化データを収集整備する。
- 3) 合理的に計測できる 線放出核種（例えばCo-60,Mn-54,Eu-152等）で信頼性のある検認が可能かどうかの検討を進める。
- 4) クリアランスレベル検認に係る技術的方法、手順の策定を進める。

加速器施設等の解体に伴い発生する廃棄物 に対するクリアランスについて

(検討状況 その1)

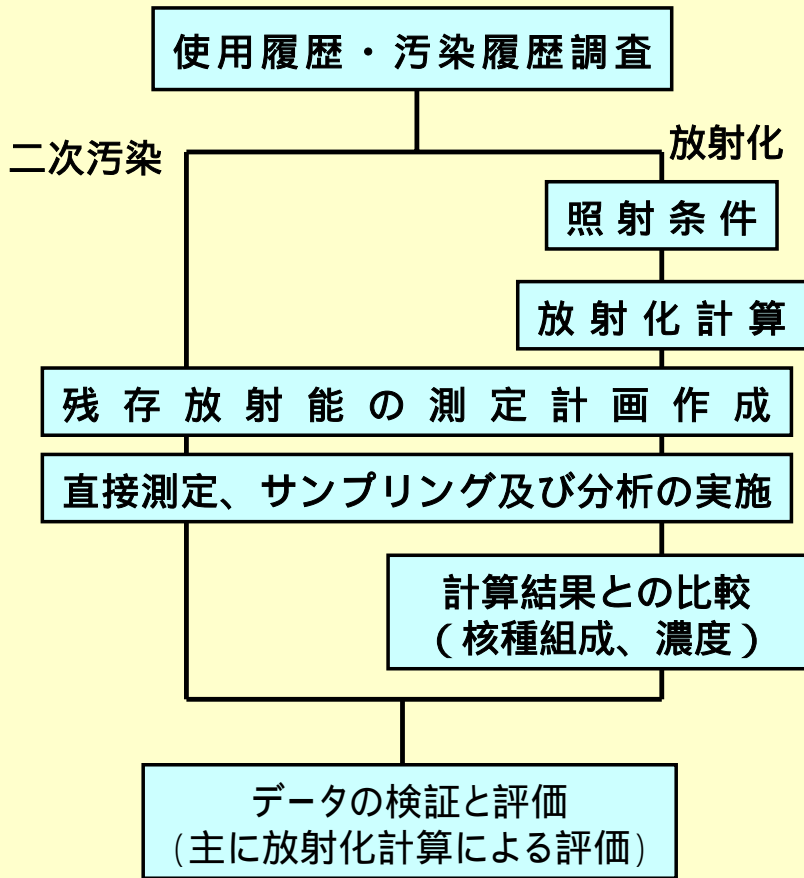
参考資料

検認手順と検討課題

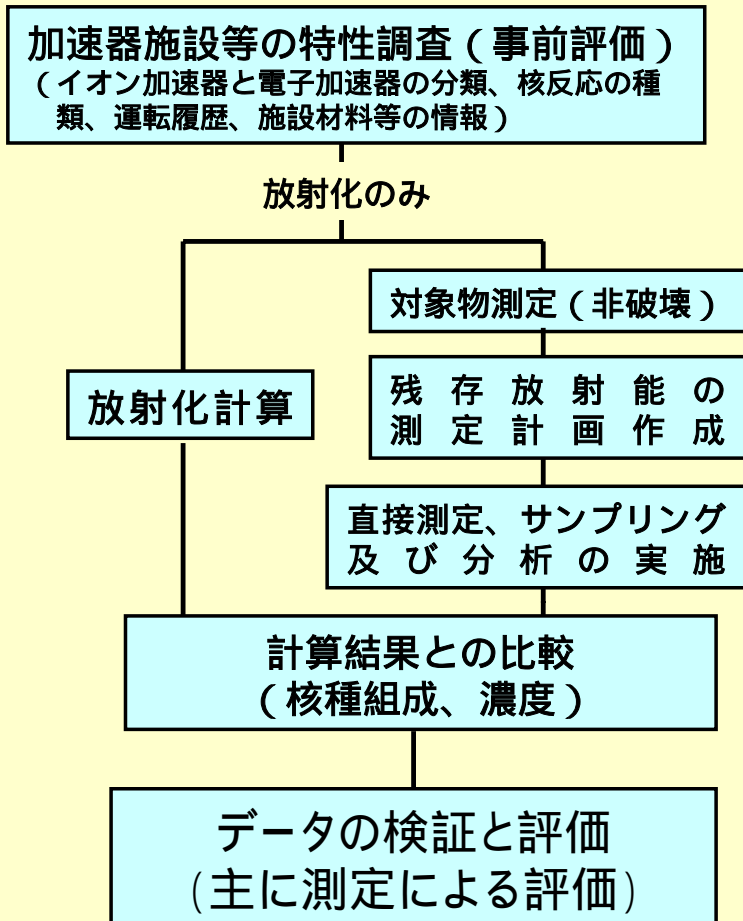


クリアランスレベル検認における 事前評価手順(案)

原子炉施設



加速器施設(案)



加速器施設等の放射化とその特性

(原子炉施設との比較) - 1

発生機構

1) 核反応

原子炉施設 : 核反応は主にn, 反応、放射化濃度レベルが高い

加速器施設 : 核反応は多種 (n, 、n,p、 ,n反応他)

陽子、重イオンによる核反応

* 加速器施設の放射化は、基本的には2次中性子と制動放射線で発生。放射化濃度レベルが低い

2) 放射化に係る照射条件

原子炉施設 : 定格出力、定常運転

運転履歴と機器配置等から放射化計算による核種及びその濃度の推定が可能

加速器施設 : 加速粒子、エネルギー、ターゲット等が多種多様

運転履歴、加速器性能等からの放射化計算による核種及びその濃度の推定は困難

測定による推定が必要

加速器施設等の放射化とその特性

解体廃棄物の発生量(推定)

(単位:t)

施設種類 廃棄物種類	日本原子力研究所			KEK 12GeV陽子加速器
	大型放射線発生 装置を全数解体 した場合	タンデム 加速器	イオン照射 研究施設 (TIARA)	
放射性廃棄物 (低レベル、極低レベル)	46,000	2,400	3,700	40,000
クリアランス対象廃棄物	23,000	3,200	5,000	69,000
放射性廃棄物でない廃棄物	430,000	85,000	95,200	41,000
合 計	499,000	90,600	103,900	150,000

:高崎研、那珂研、関西研及び東海研陽子加速器開発室、タンデム加速器、リニアックを積算

原子炉施設との比較

クリアランス対象の材料

原子炉施設：

鉄及びその合金(ステンレス、炭素鋼)、コンクリート(重コン、普通)

加速器施設等：対象材料が原子炉施設に比べて多様

鉄及びその合金(ステンレス、炭素鋼)、アルミ及びその合金、銅等、
コンクリート(重コン、普通)

クリアランス対象の汚染特性

汚染特性

原子炉施設：放射化及び二次的汚染

二次的汚染物質の挙動：核種の化学的特性によって変化

加速器施設：放射化のみ

生成放射化物：材料中に固定

スケーリングファクター(SF)の成立性

原子炉施設：放射化

成立(一部、平均放射能濃度法による)

二次的汚染

あり

加速器施設：放射化

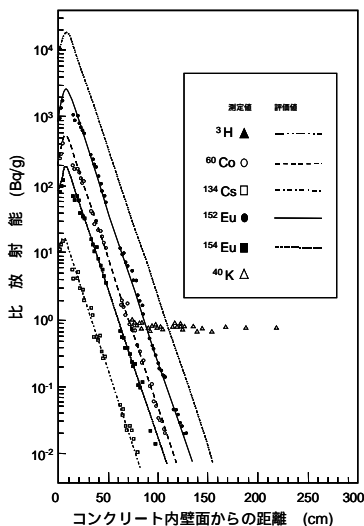
成立(今後もデータ収集を進める)

二次的汚染

なし

原子炉施設と加速器施設にコンクリート中の放射能濃度分布の一例

原子炉施設 (JPDR)



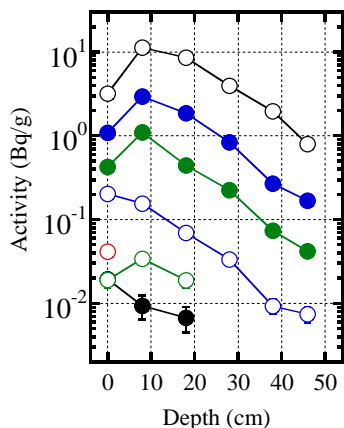
濃度分布：

- 表面約10cmにピーク、深部は指数関数的に濃度減少

核反応：

- n, 反応

電子リニアック 電子



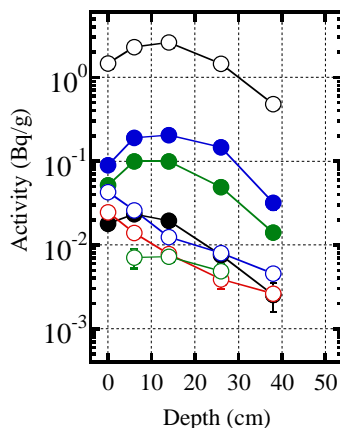
濃度分布：

- 同左

核反応：

- 主にn, 反応

加速器施設 サイクロトロン 陽子



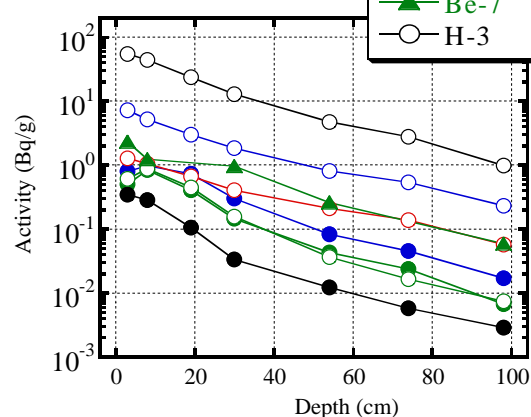
濃度分布：

- 表面から約10cmにピーク、深部は指数関数的減少が混在

核反応：

- n, 反応と高エネルギー粒子核反応が混在

12GeV 加速器 KEK 陽子他



濃度分布：

- 表面から指数関数的減少

核反応：

- 主に高エネルギー粒子核反応

(参考:クリアランス濃度 Eu-152:0.1, Co-60:0.1, Cs-134:0.1, Mn-54:0.1, Na-22:0.1, Sc-46:0.1, Be-7:10, H-3:100(Bq/g))

放射化計算による放射能濃度Dを基に、 クリアランスレベルCとの比D/Cの評価例

- 1) クリアランスレベル：RS-G-1.7を適用する。
- 2) 停止後0.5年経過後の冷却期間をおいたものとして核種濃度を評価する。
(廃止決定から半年で申請手続き実施を想定)
- 3) 各施設における材料毎に放射化計算を実施
- 4) D/C：評価対象核種の濃度(D)をクリアランスレベル(C)で除したもの
D/Cが最大値の核種：最重要核種
相対重要度：最重要度核種のD/Cを1として規格化
- 5) 結果：放射化試算による放射性核種組成に基づく
相対的な重要度について核種評価結果を表1に示す。
コンクリートでは、最重要核種から約2桁目までを放射能測定で検出した。但し、核種のための測定であり、次年度に難測定核種についてのデータを収集の予定。
また、金属に関する測定データの収集をあわせて実施する予定。

RS-G-1.7における評価の概要

<p>評価の前提条件</p>	<ul style="list-style-type: none"> ●食物、飼料等以外の固体状物質を想定している。 ●大量(1トンオーダー以上)の固体状物質に対して、人工放射性核種については、一般免除レベル(一般クリアランスレベル)を導出している。天然放射性核種については除外の概念からレベルを導出している。
<p>基準値の導出方法</p>	<p>【人工起源の放射性核種】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●代表的な被ばくシナリオを設定し、核種毎に各シナリオに対して標準と考えられる人が受ける被ばく線量を計算する。この時、被ばく線量が最も高くなるシナリオを決定経路とする。決定経路における被ばく線量を線量規準に対する放射能濃度に換算し、核種毎のクリアランスレベルとする。
<p>線量規準値</p>	<ul style="list-style-type: none"> ●通常と考えられるシナリオに対して $10 \mu\text{Sv/y}$ ●発生頻度が小さいと考えられるシナリオに対して 1mSv/y (実際には可能性が低いと考えられるパラメータを使用) ●皮膚の被ばくに対して 等価線量50mSv/y
<p>シナリオの選定方法</p>	<ul style="list-style-type: none"> ●各国の評価事例をもとに重要かつ包括性があると考えられるシナリオを抽出している。過度に保守的にならないよう選定

RS - G - 1.7で考慮されている評価経路

経路	評価対象者	被ばく	評価経路の内容	評価対象物
輸送作業	作業員	外部	トラック運転手の作業	装置、トラック積荷
処分場又は鋳物工場以外の施設	作業員	外部、吸入、 経口摂取	処分場又は鋳物工場以外の施設での作業	埋設する汚染物質、 ダスト
		皮膚汚染	作業員のダストからの皮膚汚染	ダスト
	居住者(子供)	吸入、 経口摂取	周辺居住者が施設から放出されたダストを吸入、 ダストが沈着して汚染した土壌で栽培された農作物を摂取	ダスト、 汚染土壌での栽培食物
	居住者(成人)			
鋳物工場	作業員	外部、吸入、 経口摂取	鋳物工場での作業	装置、スクラップ、 ダスト
	居住者(子供)	吸入	鋳物工場周辺に住む子どもがダストを吸入	ダスト
家の建材への再利用	居住者(成人)	外部	汚染した材料で建設された家に居住	汚染建材
公共物への再利用	居住者(子供)	外部、吸入、 経口摂取	汚染した材料で建設した公共場における子どもの外部被ばく、ダストの吸入、経口摂取	汚染再利用物、 ダスト
地下水移行	居住者(子供)	経口摂取	井戸水の飲用、農作物摂取、淡水産物の摂取	井戸水、食物、魚
	居住者(成人)			

クリアランス適用対象物としてRS-G-1.7は食物、飲料水等を除いた物質、委員会報告書は主に金属、コンクリートを想定

暫定値

表1 試算による放射性核種組成に基づく
相対重要度評価例 (停止0.5年後)

施設名	FNS					TIARA					LINAC				
	材質	コンクリート	ステンレス鋼	炭素鋼	アルミ	銅	コンクリート	ステンレス鋼	炭素鋼	アルミ	銅	コンクリート	ステンレス鋼	炭素鋼	アルミ
最重要核種		Co 60	Mn 54	Zn 65	Co 60	Mn 54 (36.4)	Co 60	Mn 54	Zn 65	Co 60	Eu152 (44.2)	Co 60	Co 60	Zn 65	Co 60
最重要核種の1/10		Eu152 (13.4) Mn 54 (7.7)	Mn 54	Co 60	Mn 54	Na 22 (25.8) Eu152 (12.7) Co 60 (11.5) Sc 46 (7.7)	Mn 54	Co 60	Mn 54		Co 60 (34.6) Sc 46 (6.5) Cs134 (5.8)				
以上合計		(86.8)				(94.2)					(91.0)				
最重要核種の1/100		Sc 46 (5.5) Na 22 (2.6) Cs134 (1.9) Zn 65 (1.1)	Co 58		Sc 46	Cs134 (2.1) Zn 65 (1.4) Eu154 (1.2)	Co 58 Co 57		Sc 46		Eu154 (4.2) Zn 65 (1.9) H 3 (1.1) Ta182 (0.7) Mn 54 (0.6)		Mn 54		Ni 63
以上合計		Eu154 (1.1) (99.0)				(98.7)					(99.4)				
最重要核種の1/1000		H 3 Ta182 Te123m	Co 57 Zn 65 Fe 59	Fe 59 Co 58 Zn 65 Co 57 Eu152 Fe 55	Co 60 H 3	Ni 63	H 3 Ta182 Fe 59 Te123m Ca 45 Fe 55	Zn 65 Co 56 Fe 59	Fe 59 Co 58 Co 57 Zn 65 Fe 55 Eu152	Co 60 H 3 Na 22 Fe 59	Ni 63	Te123m Ca 45 Fe 59 Na 22	Mn 54 Zn 65	Fe 59 Eu152 Zn 65 Fe 55	Mn 54

測定で検出された核種 金属の材質: ステンレス鋼; SUS304、炭素鋼; SS400、アルミ; A6063、銅; C1100
()内はD/Cの合計に対する割合 単位%

相対的に重要となる核種は、核種を測定する事で、確認ができることが推察される。