

JCO臨界事故による周辺中性子線量の評価

今中哲二（京都大学原子炉実験所）

目的：JCO臨界事故の特徴のひとつは、その環境影響の主役が中性子だったことである。本研究では、周辺環境中での中性子輸送計算を行い、その結果を線量測定データや放射化測定データと比較することによって、中性子スペクトルや線量分布、さらにはそれらの方向性や建物等による遮蔽効果の評価を試みる。

- ▶ 当初の計算：2次元の簡略なモデルを用いて、大気・地面系での輸送計算を行い、計算結果は中性子線量測定データに fitting した。
 - ・DOT 計算：地上 3 m（または 20 m）に無遮蔽で核分裂スペクトル線源を設置。
 - ・MORSE 計算：沈澱槽を模擬した水円柱の中で核分裂スペクトル中性子をランダムに発生。
転換試験棟は、半径 5 m 壁厚 20 cm 高さ 8 m のコンクリート円筒で模擬（天井なし）。
- ▶ 現在の計算：3次元モデルを用いて、沈澱槽漏洩スペクトル、冷却塔 SUS ネット放射化、転換試験棟周辺、さらにはJCO敷地内と範囲を拡大しながらの計算を実施中。
結果を放射化測定データと比較しながら計算の妥当性を検討。

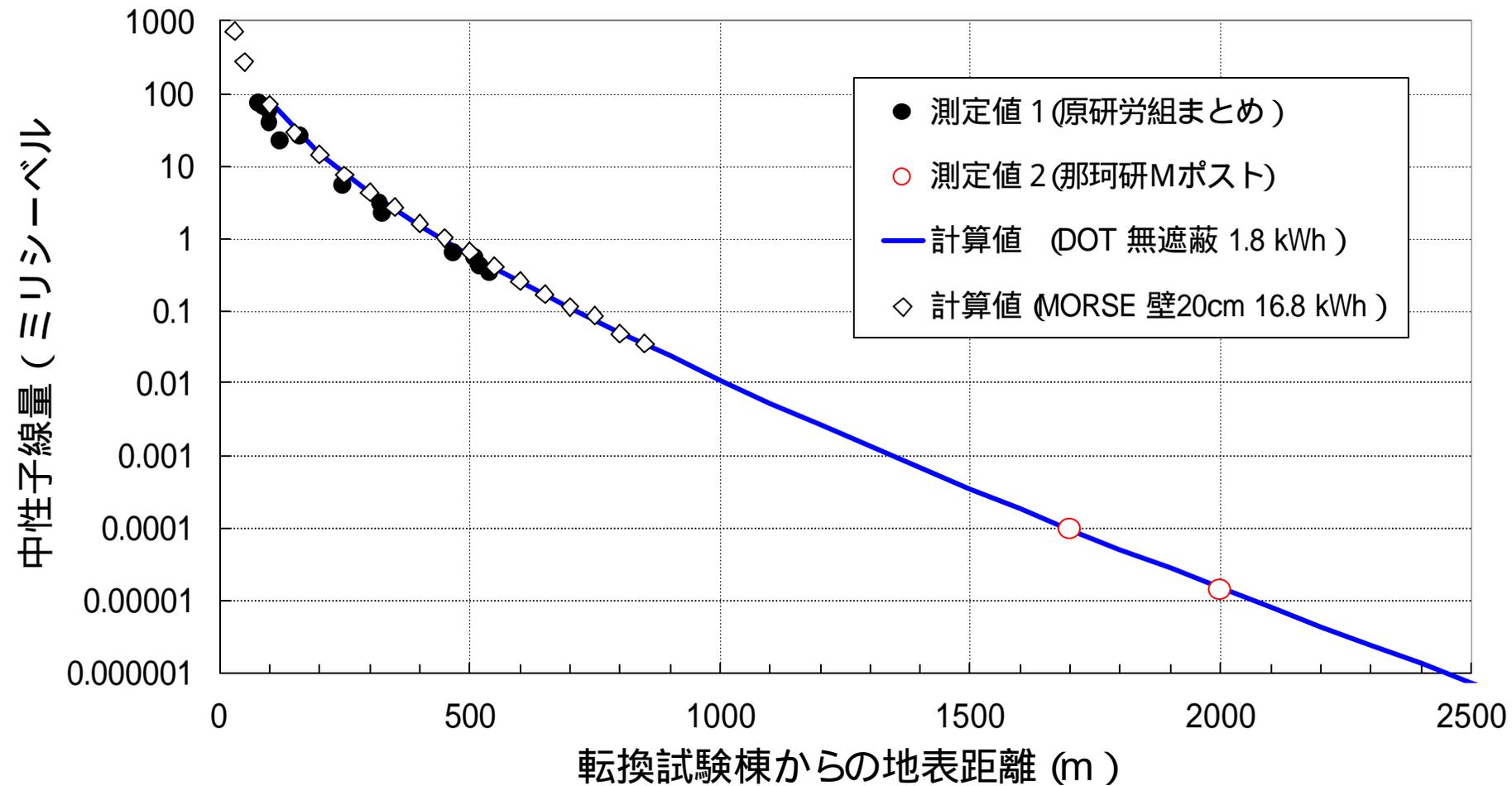


図1 地表1mの中性子線量 測定値と計算値

➤ DOT 計算によって得られた中性子線量曲線（実線）を、1.7kmの中性子モニタリングポスト測定データで fix すると、JCO 敷地周辺の線量測定データとよく合い、臨界にともなう総発生出力は 1.8kWh（核分裂数 2.0×10^{17} 個）となった。一方、モンテカルロ MORSE 計算による中性子線量曲線を用いると、16.8kWh（ 1.9×10^{18} 個）となった。

No-3

➤ 図2に金の放射化測定値と計算値の比較を示す。計算は図1のDOTと同じである。測定と計算は比較的よい一致を示している。

➤ 図1の中性子線量は主に速中性子によるものであるが、図2のAu197(n,g)Au198反応は、主に熱中性子によるものである。中性子線量測定データにfittingした計算が、金の放射化測定データとも合っていることは、我々の中性子計算が臨界事故による中性子影響をうまく再現しているものと思われた。

➤ 表1に示すように、我々の中性子線量の評価値は、科技庁報告とほぼ一致した。

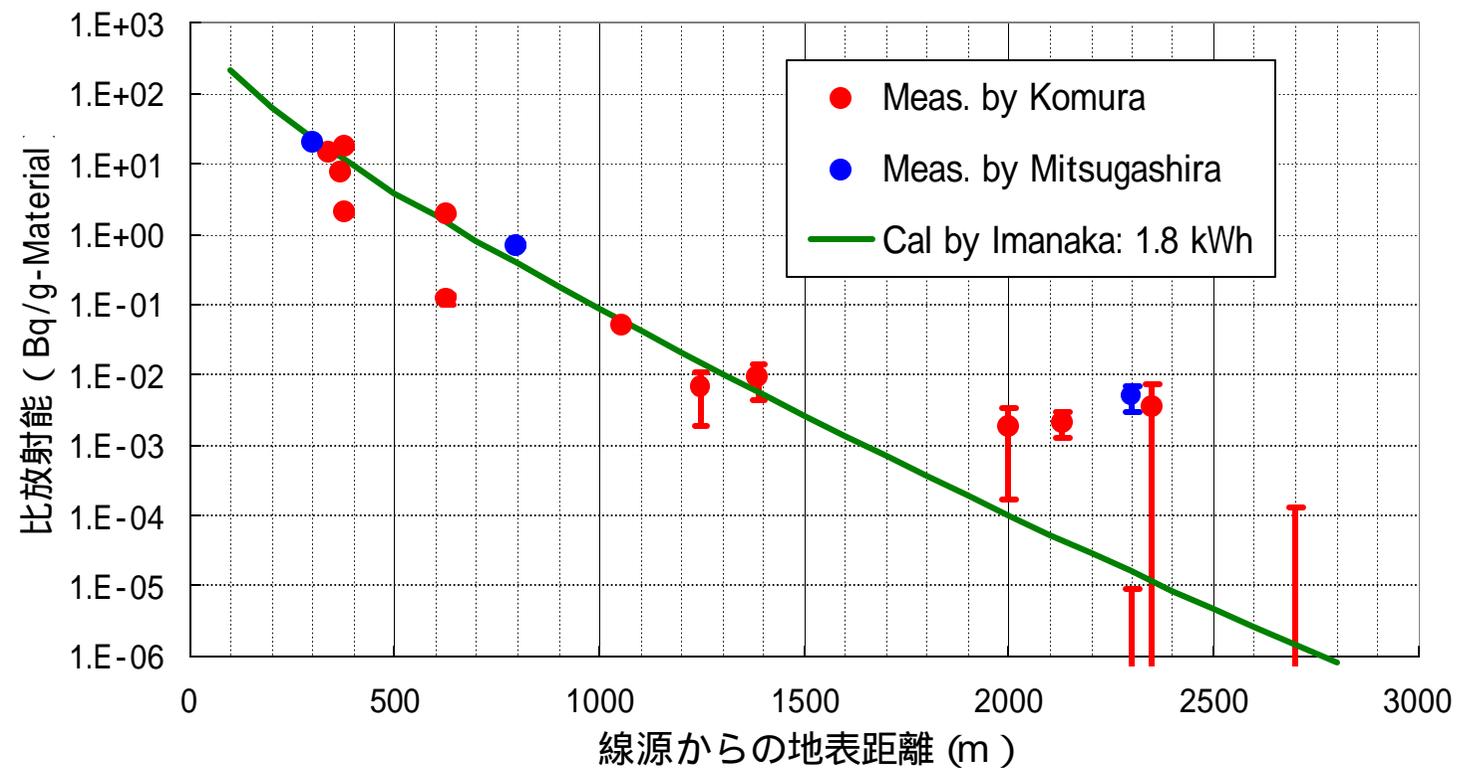


図2 地表1mでの金放射化量(9月30日10:35時点)測定値と計算値(出力1.8kWh)

表1 屋外中性子線量の評価値の比較

距離	屋外での1cm線量当量 (mSv)	
	今中の評価	科技庁(99年12月)
100 m	81	87
300 m	4.2	3.7
500 m	0.59	0.51
1000 m	0.011	0.012
1500 m	0.00035	0.00046

No-4

➤ DOT や MORSE の計算結果をさまざまな放射化測定データと比較してみた。

表2 J E Rなどに報告されている中性子放射化測定データ

	サンプル	距離	検出核種
転換試験棟直近	小島ら 冷却塔 SUS ネット	約 2 m	Co58、Co57、Mn54、Co60、Fe59、Cr51
	中西ら 土壌	約 10m	Na24、La140、Sb122、Fe59、Sb124、Sc46、Zn65、Cs134、Co60
	中西ら ポンベ	約 15m	Mn54、Fe59、Co60
	小出ら 土壌	約 3 ~ 35m	Na24、Sc46、Fe59、Co60、Zn65、La140、Sm153
J C O敷地内	村田ら 土壌	10 ~ 200m	Na24、Sc46、Mn54、Fe59、Co60、Zn65、Br82、Sb122、Cs134、La140
	室山ら 化学薬品	65m	Sr95、Ag110m、Cr51、Ce141、Co58、Co60、Fe59
J C O敷地周辺	高田ら 境界フェンス	約 80 ~ 100m	サーベイ
	小藤ら 食塩、KCl	70 ~ 360m (8 点)	Cl35(n,a)P32
	遠藤ら SUS スプーン他	135 ~ 372m (5 点)	Cr50(ng)Cr51
	河野ら 5 円玉	100 ~ 550m (16 点)	Zn64(n,g)Zn65
	小村ら 金製品	342 ~ 2700m (16 点)	Au197(n,g)Au198

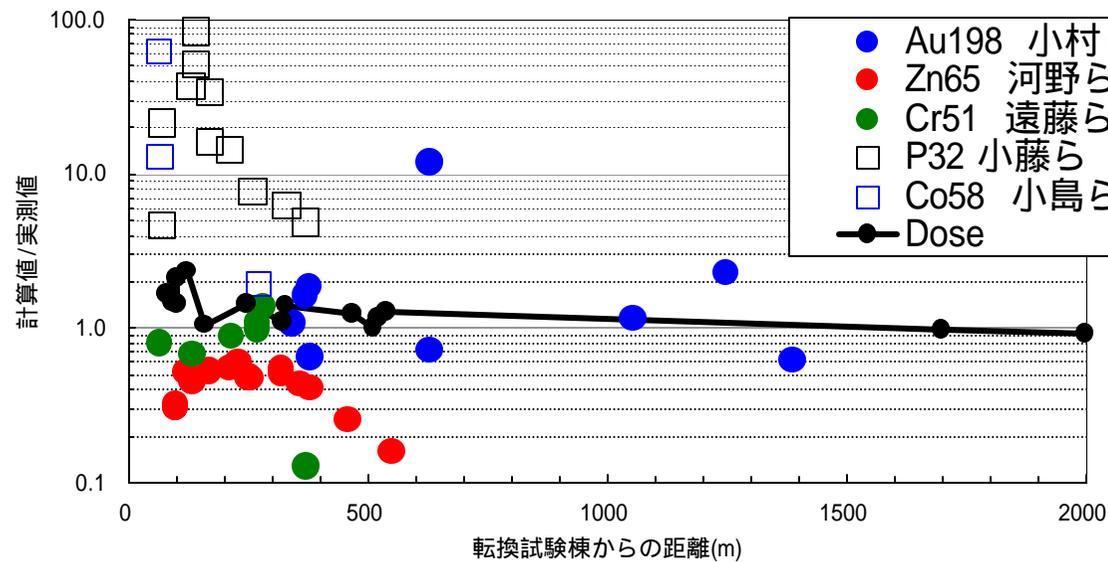


図3 放射化量の計算値/実測値：DOT計算
Zn65、Au198、Cr51はthermal反応、P32、Co58はfast反応
計算はDOT (fissionスペクトル 1.8kWh無遮蔽) Mポストデータでfitting

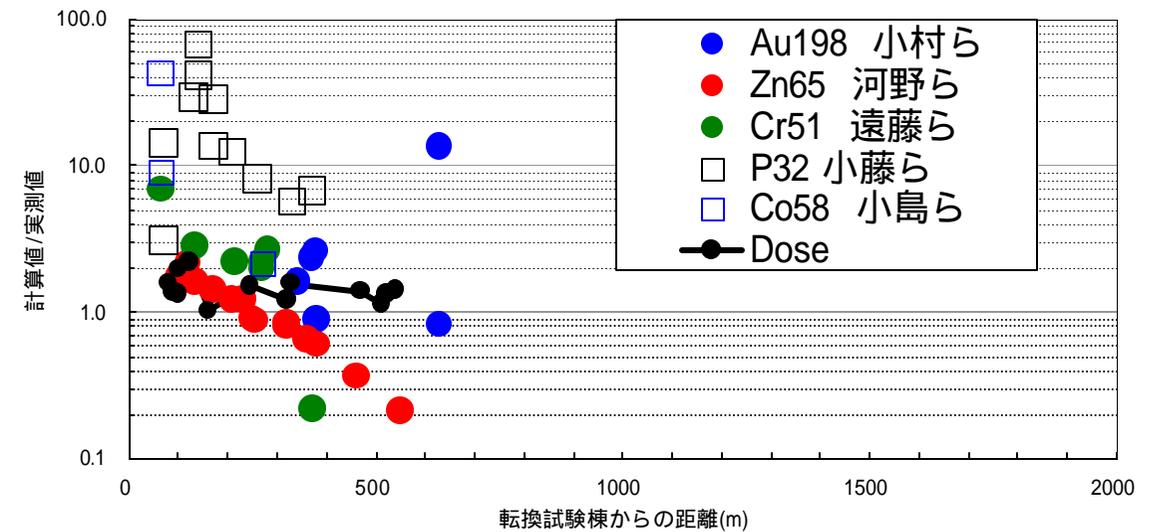


図4 放射化量の計算値/実測値：MORSE計算
Zn65、Au198、Cr51はthermal反応、P32、Co58はfast反応．計算はMORSE (沈澱槽を水溶液で模擬しfissionスペクトル中性子を発生．転換試験棟は厚さ20cm壁をもつ半径5mの円筒で模擬) で絶対値を、DOTのdose計算値にfitting．総出力17kWh．

3次元詳細計算のこれまでとこれから

- ステップ1：沈澱槽漏洩スペクトル計算（スミ）
- ステップ2：冷却塔SUSネット放射化計算（スミ）
- ステップ3：転換試験棟周辺計算（一応スミ）
- ステップ4：JCO敷地内建物分布を考慮した3次元計算（～80m程度）
- ステップ5：JCO敷地周辺計算：3次元と2次元の比較（数100mまで）
- ステップ6：forward-adjoint coupling計算と家屋透過効果の評価

- 中性子スペクトル、漏洩中性子の方向性、建物等の陰になる遮蔽効果、家屋内への透過効果といったファクターをキチンと評価するためには、沈澱槽からの漏洩スペクトルを求め、それに基づいて3次元形状モデルを用いた輸送計算を行う必要がある。

No-6

◇ 3次元計算ステップ1：沈澱槽漏洩中性子エネルギースペクトルと方向分布の計算

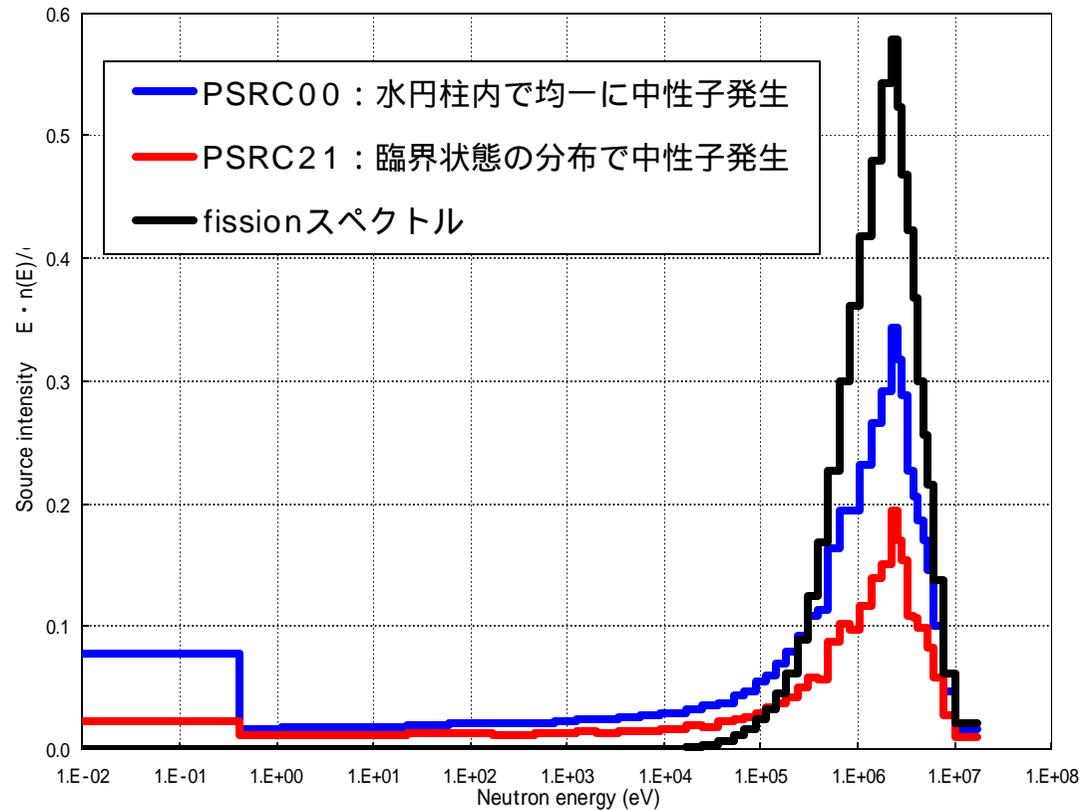


図5 JCO沈澱槽からの漏洩中性子スペクトル（発生中性子1個当たり）
 PSRC00：水円柱モデルで均一に中性子を発生
 PSRC21：（硝酸ウラニル溶液、SUS容器、水ジャケット）沈澱槽モデルの臨界分布で発生
 fission：漏洩割合は、 $(2.06(\text{値}) - 1(\text{連鎖反応分})) / 2.06 = 0.515$ とした

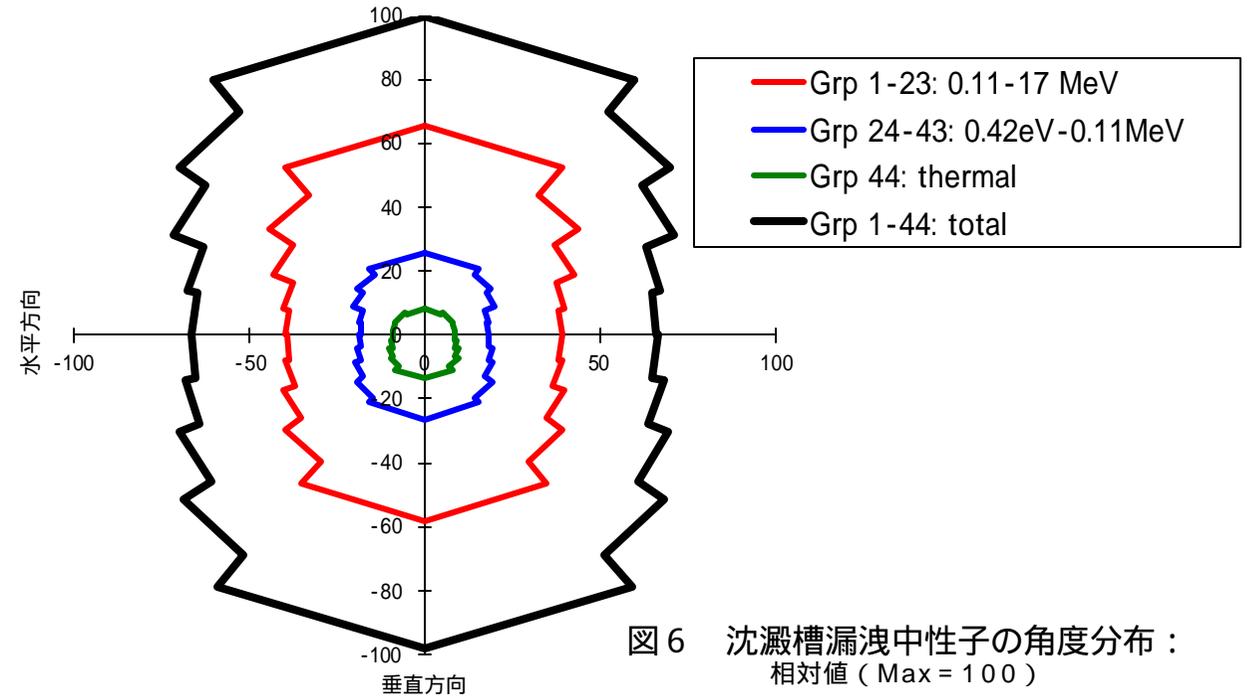


図6 沈澱槽漏洩中性子の角度分布：
 相対値 (Max = 100)

表3 沈澱槽からの中性子漏洩率（発生中性子1ヶ当たり）

計算シリーズ	PSRC00	PSRC01	PSRC12	PSRC20	PSRC21
沈澱槽モデル	水のみ	硝酸ウラニル溶液のみ	硝酸ウラニル溶液のみ	硝酸ウラニル + SUS	硝酸ウラニル + SUS + 水 + SUS
発生モード	均一発生	均一発生	臨界分布	臨界分布	臨界分布
漏洩率	0.582	0.492	0.349	0.339	0.286

No-7

◇ 3次元計算ステップ2：冷却塔 SUS ネット放射化計算

➤ 転換試験棟外壁沿いにある沈澱槽冷却塔 SUS ネット（距離 2 m）の放射化計算を行い、小島らの測定値と比較して総核分裂数の評価を行った。Ni58(n,p)Co58 反応に基づく総核分裂数評価値は、 2.5×10^{18} 個となり、原研の計算結果（ 2.4×10^{18} 個）とよく一致した。

表 4 SUS 計算シリーズとそれぞれの幾何学形状

CBS001 シリーズ	空気のみ
CBS010 シリーズ	空気と側壁 1 枚のみ
CBS020 シリーズ	空気、側壁 1 枚、基礎コンクリートと地面
CBS030 シリーズ	空気、転換試験棟、地面
CBS040 シリーズ	空気、転換試験棟、地面、隣の建物

表 5 SUS 放射化計算結果と核分裂数評価値

RUN No	小島ら測定値 (A) Bq/g	発生粒子当り放 射化量 (B) Bq/g/source-n	総核分裂数	
			A / (B × 242 × 0.2868)	
Ni58(np)Co58	CBS001	175.0 ± 0.3	1.01E-16	2.49E+18
	CBS010	175.0 ± 0.3	9.07E-17	2.78E+18
	CBS020M	175.0 ± 0.3	9.78E-17	2.58E+18
	CBS031X	175.0 ± 0.3	1.01E-16	2.49E+18
	CBS040X	175.0 ± 0.3	9.98E-17	2.53E+18
Co59(ng)Co60	CBS001	2334 ± 5	4.61E-16	7.30E+18
	CBS010	2334 ± 5	4.98E-16	6.76E+18
	CBS020M	2334 ± 5	9.54E-16	3.52E+18
	CBS031X	2334 ± 5	1.07E-15	3.14E+18
	CBS040X	2334 ± 5	1.10E-15	3.06E+18

No-8

◇ 3次元計算ステップ3：転換試験棟周辺の放射化計算

計算形状：図7に示すように、転換試験棟を3次元でモデル化し、周辺に12カ所の計算ポイントを配置。核分裂数が 2.5×10^{18} 個のときの放射化量を計算した。表6に、SUSボルト(D3:7.8m)、土壌(D4:10m)、ポンベ(D10:15m)での測定値と計算値を示す。計算/測定比は、thermal反応で1.3~2.9、fast反応で2.4~4.4となっている。

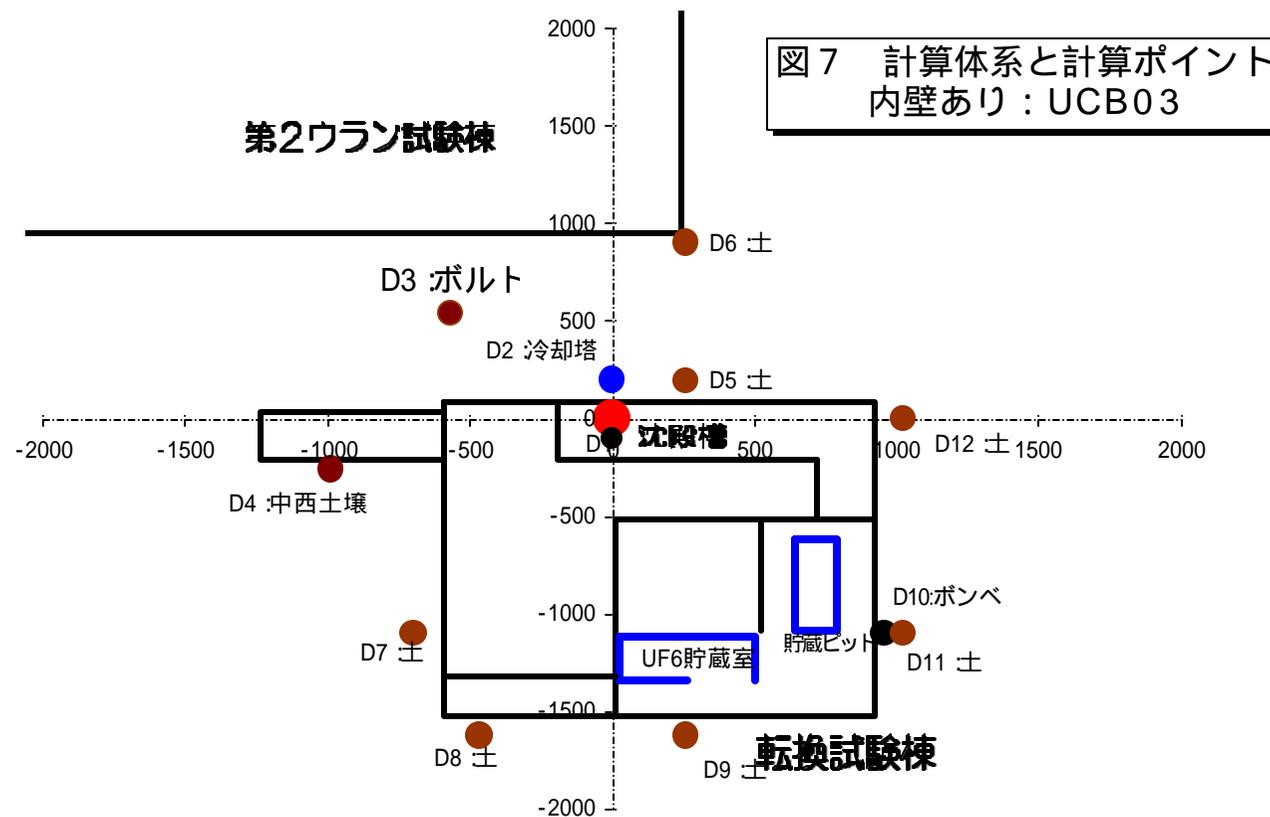


表6 転換試験棟周辺サンプル放射化量の測定値と計算値
(網掛けはfast反応)

サンプル	測定値 Bq/g元素	計算値 (Bq/g元素) 核分裂数 2.5×10^{18} の時	計算値 / 測定値
小島ボルト:			
Fe59	0.49	0.81	1.7
Mn54	0.04	0.13	3.3
中西土壌:			
Co60	103	150	1.5
Fe59	0.515	0.65	1.3
C134	123	170	1.4
Sc46	2136	3000	1.4
Zn65	8.22	11	1.3
Na24	5705	16000	2.8
			1.9*
Mn54	0.0041	0.018	4.4
中西ポンベ: (平均)			
Fe59	0.0973	0.28	2.9
Mn54	0.00655	0.016	2.4

*: 臨界期間中のNa24のdecayを大ざっぱに補正した値。

➤ 今後、計算範囲を徐々に広げながら、3次詳細モデル計算と2次元簡略モデル計算とを「やわらかくつなげる」努力を行い、中性子影響の方向性や家屋透過効果の評価を試みる。