第80回原子力安全問題ゼミ 2000年12月12日

< J C O 臨界事故 >

## 漏洩中性子の輸送計算

今中哲二

◇ はじめに

JCO臨界事故が発生したのは、かねてから懸案であった、広島・長崎の原爆中性子問題の問題点整理と中性子計算システムのバージョンアップに取り組んでいたときであった。原爆中性子計算の第一段階は、空中に点線源をおいて地上各距離での中性子束を求める計算であり、JCO事故の中性子計算に即座に適用できた。

JCO事故のもっともシンプルな模擬計算の結果が出たのは、事故の翌日の10月1日であった。沈澱槽や転換試験棟などの構造を無視し地上3mに裸の核分裂スペクトル線源をおいた計算である。簡単な遮蔽モデルを用いた追加計算を行い、敷地境界(約70m)で4mSv/hの中性子線量が18時間続いたという新聞報道を基に約0.5mgと核分裂ウラン量を推定し、外部に発信したのは10月6日であった。

昨年 11 月 1 日の原子力安全問題ゼミでは、計算モデルを若干改善し、JCO 敷地周辺での 中性子線量モニタリングデータにこちらの計算結果を fitting するという手法で、核分裂ウラ ン量 0.7mg(0.5~1.0mg)、核分裂数 1.8×10<sup>18</sup>個という数字を報告した。

その後、科研費小村グループでの問題提起などを受け、沈澱槽内での核分裂からはじまっ て環境中での中性子の挙動を、建物の構造などを3次元モデルで模擬しながら追跡するとい う計算を開始した。これまでに、敷地周辺約150mまでの計算結果が得られ、各種の放射化 データ、中性子線量データとの比較を行っているところである。これまでの計算結果を紹介 する。

◆ 昨年の2次元モデル計算

2次元 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<sup>17</sup>個)となった(図1)。一方、モンテカル



図1 地表1mの中性子線量:測定値と計算値

ロ MORSE 計算による中性子線量曲線を用いると、16.8kWh(1.9×10<sup>18</sup>個)となった。図 1の中性子線量計算結果は、科技庁の評価(99/12/11に下方修正された2ndバージョン)と よく一致している。

図2は、図1の DOT 計算で得られた屋外中性子束を用いて放射化量を計算し、それぞれの 測定値(表1)と比較したものである。計算値はもともと、1.7kmの中性子線量測定データ に合わせたものであり、中性子線量の計算値 / 測定値比(実線)は1前後の値を示している。 一方、速中性子の反応によって生成するCo58やP32では1よりかなり大きな値が認められ、 また熱中性子反応による Zn65 や Cr51 は概して1より小さな値となっている。

放射化データに認められる計算と測定との不一致は、家屋の遮蔽効果や転換試験棟から放 出された中性子の方向分布によるものと考えられるが、2次元モデルの計算では、そうした 効果を計算できない。



放射化量の計算値/実測値:DOT計算 図 2 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

表1	科研費小	村グループなど	こよって報告されて	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 SS ネット	約 2 m	Co58、Co57、Mn54、Co60、Fe59、Cr51
	山西ら	十撞	約 10m	Na24、La140、Sb122、Fe59、Sb124、Sc46、Zn65、
	1.4.5	14		Cs134、Co60
	中西ら	ボンベ	約 15m	Mn54、Fe59、Co60
	小出ら	土壌	約 3 ~35m	Na24、Sc46、Fe59、Co60、Zn65、La140、Sm153
ICO敷地内	村田ら	十戂	10 ~ 200m	Na24、Sc46、Mn54、Fe59、C060、Zn65、Br82、
	-11H D	<u> </u>	10 20011	Sb122、Cs134、La140
	室山ら	化学薬品	65m	Sr95、Ag110m、Cr51、Ce141、C058、Co60、Fe59
JCO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、KCI	70~360m(8点)	CI35(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

JCO 事故によって環境中に漏洩した中性子の影響をトータルに解析するため、今年の春より、3次元モデルに基づく計算への取り組みをはじめた。最終的な目標をJCO敷地周辺家 屋内での放射化量・中性子線量の評価とし、以下のような計算戦略を組み立てた。

- > ステップ1:沈澱槽から漏洩した中性子スペクトル計算
- ▶ ステップ2:冷却塔SUSネット(2m)測定データとの比較による核分裂数評価
- ▶ ステップ3:転換試験棟周辺放射化計算(~20m)と測定データとの比較
- ▶ ステップ4:敷地内建物を考慮した3次元計算(~100m)と測定データの比較
- ▶ ステップ5:敷地周辺家屋(~300m)での野外中性子計算:3次元と2次元の比較
- ステップ6:家屋遮蔽計算と forward-adjoint coupling による屋内放射化・線量評価 これまでにステップ4までの計算をおわり、まずまずの結果が得られている。

▶ ステップ1:沈澱槽漏洩スペクトル

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	0.287
増倍係数: k 値	-	-	$0.943 \pm 0.002$	$0.952 \pm 0.002$	$0.991 \pm 0.003$

表2 沈澱槽からの漏洩率(発生中性子1ヶ当り)

Z=28cm	Z方向											
	10	258	260	246	232	211	187	157	129	104	77	
	9	535	550	512	484	443	389	330	270	208	143	
	8	778	769	720	658	601	528	446	361	278	198	
	7	926	912	854	794	724	635	538	430	332	231	
	6	997	964	934	869	783	689	588	471	355	255	
	5	1000	997	961	881	798	705	596	479	367	257	
	4	952	962	897	849	750	667	566	453	349	247	
	3	858	846	800	742	680	598	498	402	308	217	
	2	691	682	653	606	553	485	402	330	251	176	
Z=0cm	1	496	481	464	422	385	347	287	234	181	125	
_ 5011	メッシュNo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	r 方向
r=0cm						r=22.5cm						

図 3 沈殿槽内部での核分裂密度分布:相対値(MAX = 1000) ・PSRC21: <硝酸ウラニル溶液 + SUS + 水ジャケット + SUS > モデル 底部には水ジャケット(厚さ2.2cm) があるが上面は開放のため、核分裂分布には下への偏りが若干認められる.



図 4 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(値)-1(連鎖反応分))/2.06=0.515とした



図5 沈澱槽漏洩中性子の方向分布

▶ ステップ2:冷却塔 SUS ネット放射化計算

沈澱槽冷却水の冷却塔 SUS ネット(沈澱槽中心から2mと想定)の放射化量を計算し、小 島らの測定値と比較することにより、総核分裂数の評価を試みた。

表3 RUN シリーズとそれぞれの幾何学形状

A:CBS001 シリーズ	空気のみ
B:CBS010 シリーズ	空気と側壁1枚のみ
C:CBS020 シリーズ	空気、側壁1枚、基礎コンクリートと地面
D:CBS030 シリーズ	空気、転換試験棟、地面
E:UCB03 シリーズ	CBS40 + 内部間仕切り、廊下

表4 SUS ネットの放射化量計算結果と総核分裂数推定値

反応	小島ら測定値 (M) Bq/g-元素	形状モデル (表3参照)	放射化量計算値* (C) Bq/g-元素	総核分裂数** (×10 <sup>18</sup> )
		А	$(1.01\pm0.04)\times10^{-16}$	2.5
		В	(9.06±0.19)×10 <sup>-17</sup>	2.8
<sup>58</sup> Ni(n,p) <sup>58</sup> Co	175.0±0.3	С	(9.78±0.23)×10 <sup>-17</sup>	2.6
		D	$(1.01\pm0.03)\times10^{-16}$	2.5
		E	(9.54±0.05)×10 <sup>-17</sup>	2.6
		А	$(1.57\pm0.06)\times10^{-18}$	2.5
		В	$(1.41\pm0.03)\times10^{-18}$	2.7
${}^{54}$ Fe(n,p) ${}^{54}$ Mn	2.691±0.008	С	$(1.52\pm0.04)\times10^{-18}$	2.5
		D	$(1.58\pm0.05)\times10^{-18}$	2.5
		E	$(1.57\pm0.01)\times10^{-18}$	2.5
		А	$(4.61\pm0.14)\times10^{-16}$	7.3
		В	$(4.97\pm0.10)\times10^{-16}$	6.8
<sup>59</sup> Co(n,g) <sup>60</sup> Co	2334±5	С	$(9.54\pm0.14)\times10^{-16}$	3.5
		D	$(1.07\pm0.05)\times10^{-15}$	3.1
		E	$(1.23\pm0.02)\times10^{-15}$	2.7
		А	(1.79±0.05)×10 <sup>-18</sup>	7.1
		В	$(1.84\pm0.04)\times10^{-18}$	7.0
${}^{58}$ Fe(n,g) ${}^{59}$ Fe	8.89±0.08	С	$(3.80\pm0.05)\times10^{-18}$	3.4
		D	$(4.31\pm0.20)\times10^{-18}$	3.0
		Е	$(4.96\pm0.09)\times10^{-18}$	2.6
		A	$(5.39\pm0.14)\times10^{-16}$	7.0
		В	(5.47±0.13)×10 <sup>-16</sup>	6.9
${}^{50}$ Cr(n,g) ${}^{51}$ Cr	2620±6	С	$(1.17\pm0.02)\times10^{-15}$	3.2
		D	$(1.32\pm0.06)\times10^{-15}$	2.9
		Е	$(1.53\pm0.03)\times10^{-15}$	2.5

\*:発生中性子1個当りの放射化生成量.誤差はモンテカルロ計算にともなう標準誤差.

\*\*: (総核分裂数)=(M)/(C)/0.287/2.42.0.287 は沈澱槽漏洩率で、2.42 は核分裂当りの放出中性子数.

▶ ステップ3:転換試験棟周辺サンプルの放射化量

総核分裂数を 2.5×10<sup>18</sup> 個と仮定し、転換試験棟周辺サンプルの放射化量を計算した。



図6 転換試験棟と周辺サンプル位置の平面図

表 5	転換試験棟周辺サンプル放射化量の測定値と計算値

拉話	<u>᠊</u> ᠊ᠬ᠈᠊ᢞ᠋᠉ᢛ	沈澱槽からの	測定値(M)	計算値(C)		
们又作里	9 <i>7</i> 77010	距離, m	Bq/g-元素	Bq/g-元素	(C)/(M)恒	
	Bolt: B-1	8	$0.040\pm0.001$	$0.14\pm0.01$	3.5	
<sup>54</sup> Mn	Soil: D-1	9	$0.028 \pm 0.004$	$0.050\pm0.002$	1.8	
	Soil: D-2	10	$0.0041 \pm 0.0013$	$0.015\pm0.001$	3.7	
	GC: C-1	15	$0.0065 \pm 0.0001$	$0.0053 \pm 0.0007$	0.82	
	Bolt: B-1	8	$0.49\pm0.03$	$1.39\pm0.20$	2.8	
	Soil: D-1	9	$1.01\pm0.03$	$1.12\pm0.09$	1.1	
<sup>59</sup> Ea	Soil: D-2	10	$0.515\pm0.059$	$0.63\pm0.05$	1.2	
ге	GC: C-1	15	$0.097\pm0.001$	$0.22\pm0.02$	2.3	
	Soil: D-3	16	$0.06\pm0.01$	$0.15\pm0.03$	2.7	
	Soil: D-4	17	$0.12\pm0.01$	$0.23\pm0.02$	1.9	
	Soil: D-1	9	$197 \pm 10$	$258\pm19$	1.3	
<sup>60</sup> Co	Soil: D-2	10	$103 \pm 20$	$145 \pm 12$	1.4	
0	Soil: D-3	16	$23\pm5$	$34\pm 6$	1.5	
	Soil: D-4	17	$42\pm7$	53±5	1.3	
	Soil: D-1	9	$3987\pm65$	$5090 \pm 110$	1.3	
46 <b>S</b> a	Soil: D-2	10	$2186 \pm 199$	$2860\pm240$	1.4	
50	Soil: D-3	16	$291\pm20$	$680 \pm 130$	2.3	
	Soil: D-4	17	$451 \pm 24$	$1060\pm110$	1.3	



図7 JCO敷地周辺と線量測定データ点の平面図

測定点	距離	測定値	モデル	·-1	モデ	モデル-2		
	m	mSv	計算值, mSv	C/M	計算值, mSv	C/M		
S-2	122	24	$71 \pm 3$	3.0	$51 \pm 2$	2.2		
S-3	100	59	$89 \pm 3$	1.5	$66 \pm 3$	1.1		
S-4	80	77	$122 \pm 4$	1.6	$78 \pm 3$	1.0		
S-5	110	41	$60 \pm 2$	1.5	$39 \pm 2$	1.0		
S-6	90	71	$103 \pm 3$	1.5	$80 \pm 3$	1.1		
S-7	160	27	$34 \pm 1$	1.2	$32 \pm 1$	1.2		

表6 JCO 敷地境界の中性子線量測定値と計算値

注:モデル-1 では、周辺建物の内部組成は空気のみとし、モデル-2 では、周辺建物内に入射した中性 子はただちに吸収消滅するものと仮定した.



図8は、いろいろな遮蔽モデルに基づく JCO 敷地境界での中性子線量計算値と測定値を比較したものである。P-1 は測定データはないが、遮蔽効果を見積もるために加えた点である。いずれの計算も総核分裂数は2.5×10<sup>18</sup>個としてある。

実線は、核分裂スペクトルを用いた無遮蔽 DOT 計算であり、点線は沈澱槽漏洩スペクトル を点線源として用いた同じく無遮蔽の計算である。実線と点線の違いは、沈澱槽自体の遮蔽 効果であり、ファクター約3である。

菱形は、転換試験棟の遮蔽を加えたもので、図6の平面図から予想されるように、S-5 やS-6 での遮蔽効果は小さく(1割程度)、P-1でファクター2の遮蔽となる。四角と丸は、表6のそれぞれモデル-1 とモデル-2 に対応している。モデル-2 の計算結果は、S-2 点を除き、 測定値をよく再現している。菱形と比較すると、図7から予想されるように、S-3~S-6 での 遮蔽効果が大きい(ファクター3から5)。一方、P-1 では遮蔽効果ほとんど認められない。

転換試験棟の遮蔽効果と周辺建物の遮蔽効果は相殺するような形できいており、無遮蔽DOT 計算と比べた場合の遮蔽効果は、最小のP-1 方向でファクター約6、最大のP-5 方向で約15 程度である。

- ▶ まとめ
  - ・ 3次元計算によって、漏洩した中性子の挙動を敷地境界の距離(約150m)まで、ファク ター2~3以下のエラーでうまく再現できた.
  - ・ 建物などの遮蔽効果、方向性についても reasonable な結果が得られており、Step-5、 Step-6 へと計算を進めるにあたって致命的な問題はいまのところ認められない.
  - 計算モデルの改善には、転換試験棟や周辺建物の内部構造に関する情報、転換試験棟内
    外の新たな放射化測定データが必要である。