

チェルノブィル原発事故における 放射能放出量と環境汚染

瀬尾 健・海老沢徹・今中哲二・川野真治
小林圭二・小出裕章（京大炉）
久米三四郎（阪大理）

**京都大学原子炉実験所
第21回学術講演会
講演要旨集 別刷**

1987年 3 月19日

(5) チェルノブィル原発事故における放射能放出量と環境汚染

瀬尾 健・海老沢 徹・今中 哲二・川野 真治・

小林 圭二・小出 裕章(京大炉)、久米三四郎(阪大理)

§ 1 序

発電用原子炉のかかえる問題は、内部に蓄積される膨大な放射能であって、これをいかに環境に出さずに封じ込め続けられるかに、その安全性の根幹がある。特に、原発は他の巨大プラントとは比較にならない程の重装備の安全防護設備で守られている、とよく言われるが、これはとりもなおさず原発の危険性の程度を端的に反映していることに他ならない。実際一基の原発の炉心には常時数億から数100億キュリーの放射能が存在しており、暴走事故のような超弩級の事故はもちろん、停止時においても、放射能の発する膨大な崩壊熱のために、原子炉は、常にその破壊と大規模放射能放出の危険を内包している。

1986年4月26日未明、ソ連のチェルノブィル4号炉は、こともあろうにこの超弩級の事故を起こした。この事故はスエーデンでのフォールアウトの検出に端を発し、3日あとの4月29日のソ連政府の発表によって全世界に知られるようになった。事故は黒鉛の火災を伴って拡大したが、上空から大量の物質を投下する等、ソ連当局の努力により10日ほどで大量放出は終息し、その後の半年に及ぶ原子炉封じ込め工事によって、12月になってようやく「埋葬」が完了したと報じられている。

事故の概要は、1986年8月15日IAEAに提出されたソ連の報告書「チェルノブィル原子力発電所事故とその影響」¹⁾(以下では「報告書」と略記する)と、それを受けてウィーンで8月25日から開かれた専門家会議の報告書²⁾によってようやく明らかになった。それによると事故は爆発的な反応度事故によって(解析によると定格出力の480倍にも達したとされる)炉心が大破し、爆発と引き続く火災のために、大量の揮発性放射能と、粉碎された燃料微粉末そのもの(数%)がプラントの外に放出されたと言われている。

以下では、「報告書」の検討と、ヨーロッパ諸国や日本のデータの解析を行い、放射能汚染の全体像を把握するとともに、その影響がどの程度の規模になるかを議論する。

§ 2 ソ連報告書

IAEAに提出された「報告書」は、69ページの本文と、数多くの図表を含む382ページの詳しい付属文書からなっている。この付属文書の第4、5、6、7章が、ここで検討する問題と関連する。

まず放出された放射能の総量として、「報告書」ではエアロゾル性のもの 50 MCi(1.85

Table 1. Daily releases Q into the atmosphere estimated by USSR (without noble gases)

Date	Q (MCi)	
	6.5.86*	actual**
26.4	12	59
26-27.4	4.0	17.8
27-28.4	3.4	12.7
28-29.4	2.8	8.2
29-30.4	2.0	5.3
30.4-1.5	2.0	4.1
1-2.5	4.0	6.7
2-3.5	5.0	7.0
3-4.5	7.0	10.2
4-5.5	8.0	9.3
5-6.5	0.1	0.1
8-9.5	0.01	
22-23.5	0.00002	

* The values of Q are adjusted to 6.5.86 with allowance for radioactive decay (the release on 26.4.86 amounted to about 20 MCi at this moment in time).

** Actually released amounts decay-corrected by us.

$\times 10^{18}$ Bq)、希ガス約 46 MCi (1.7×10^{18} Bq)、合計 96MCi (3.33×10^{18} Bq)、誤差は 50 %と評価している。ただし、この値は5月6日の時点に崩壊補正された値である。その経日変化はTable 1 (「報告書」ではなくTable 4.13)。以下、報告書の Table, Fig.番号はく >を付けて示す)のようになっており、最初の爆発と火災で12 MCiが放出された後、一旦放出速度はおちるが再び上昇し、5月5日～6日でピークとなり、6日に到って急に減少して、事実上放出は終わったとされている。放出放射能の内訳はTable 2 (Table 4.14)のように与えられている。希ガス放出量評価の根拠ははっきりしないが、放出されやすいために100%と考えたのであろう。非ガス性放射能の量については、おそらく地面沈着量の広範囲の測定結果から推定したものと思われる。「報告書」によると発電所を中心とした30 km圏内に約20MCiが沈着しており、その外側の地域(ソ連領内)には

10 - 30 MCiが沈着したと評価されている。この評価の基となっているデータの

詳細は明かでないが、空間ガンマ線フォトグラフィーによるものと述べられている。6月26日時点の30 km圏内のデータとしてはTable 3 (Table 4.1)が示されており、その成分としてはTable 4 (Table

5.3)の数値が与えられている。そして結論として、ガス性のものを除く全放出量は50 MCiであり、これは炉心内の総量の3.5%となると述べている。IAEA会議の報告書ではさらに詳しく、炉心燃料の0.3 - 0.5%が敷地内に、1.5 - 2%が0 - 20 km圏内に、1 - 1.5%がそれ以外に飛散したと記述されている。これらの放射能による被曝線量は、ソ連領ヨーロッパ地域の半径約600 kmについて評価されている。それによると、沈着した放射能からの7450万人に対する外部被曝線量(50年間)として2900万人レム、農作物Cs汚染による内部被曝線量(70年間)として2億1000万人レムとなっている。「報告書」には予想を上回る豊富な数値が公表されているが、細かく調べると内部矛盾や、明らかなタイプミスと思われるところがある。たとえば、Table 1とTable 2のそれぞれの合計値が一致しないなど、Table 1からTable 4だけでも7カ所ぐらいの問題点がある。

放出量に関する報告書の数値は5月6日換算で示されているので、実際に放出された量

Table 2. Releases of radionuclides estimated by USSR*

Nuclide	Released activity (MCi)		Release percentage 6.5.86**
	Initial 26.4.86	Total 6.5.86**	
^{133}Xe	5	45	~100
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	0.15	-	~100
^{85}Kr	-	0.9	~100
^{131}I	4.5	7.3	20
^{132}Te	4	1.3	15
^{134}Cs	0.15	0.5	10
^{137}Cs	0.3	1	13
^{99}Mo	0.45	3	2.3
^{95}Zr	0.45	3.8	3.2
^{103}Ru	0.8	3.2	2.9
^{106}Ru	0.2	1.6	2.9
^{140}Ba	0.5	4.3	5.6
^{141}Ce	0.4	2.8	2.3
^{144}Ce	0.45	2.4	2.8
^{238}Pu	0.0001	0.0008	3.0
^{239}Pu	0.0001	0.0007	3.0
^{240}Pu	0.0002	0.001	3.0
^{241}Pu	0.02	0.14	3.0
^{242}Pu	3×10^{-7}	2×10^{-6}	3.0
^{242}Cm	0.003	0.021	3.0
^{89}Sr	0.25	2.2	4.0
^{90}Sr	0.015	0.22	4.0
^{239}Np	2.7	1.2	3.2

* Estimated error $\pm 50\%$

** Total release by 6.5.86

Table 3. Surface activity in 30-km zone (26.6.86) estimated by USSR

Air dose (mR/h)	Area of zone (km ²)	Activity (MCi)
20 <	870	5 - 8.7
10-20	480	0.8-1.4
5-10	1100	1 - 1.7
3- 5	2780	1.3-2.2
total	5230	8 - 14

Table 4.

Amounts of individual nuclides in 30-km zone estimated by USSR (11.5.86)

Nuclide	Q (MCi)
^{95}Zr	0.18
^{141}Ce	1.7
^{144}Ce	1.3
^{131}I	1.3
^{132}Te	2.5
^{103}Ru	1.5
^{106}Ru	0.57
^{140}Ba	0.91
^{134}Cs	0.13
^{137}Cs	0.23
^{89}Sr	0.62
^{90}Sr	0.035
^{91}Y	0.64
total	11.2

がどれくらいになるかを示しておこう。実量を計算するには放出量の経口変化 (Table 1 の左欄) の数値を放出当日に decay補正すればよい。これに利用できるデータは Table 5 <Table 4.10 a,b> に示す。これは原子炉上空で採取された空気サンプル中の、各核種の % を示したものである。ところが、4月29日と5月5日のそれぞれの数値の和が 100% にならない。4月29日については、おそらく ^{239}Np の値 3.0 が 30 の誤りと想像されるので、このように読みかえて用いる。Table 1 の initial discharge を除いて、毎日の放出量の成分が Table 5 のようになっていると仮定して計算すると各日の実放出量が得られる。(測定のとれている日の分は直線内挿した。) この値は Table 1 の右欄に示してある。これによると、initial discharge を除いた 10 日間の実際の放出量は合計 81.5 MCi となる。initial discharge については、Table 2 の値を用いるが、 ^{239}Np の値は、2.7 MCi を 0.27 MCi に読みかえる。5月6日換算の initial discharge, 12 MCi は、4月26日時点では 58.9 MCi となる。従って、エアロゾル性放射能の実放出量は、先の 81.5 MCi と合わせて、140 MCi となり、5月6日換算値の 2.8 倍となる。これに希ガスとガス性沃素の分を加えると、ソ連の数値を前提とした場合の、実際の全放出量になる。

Table 5. Relative activity (%) of the air sample taken above the reactor

Nuclide	26.4.	29.4.	2.5.	3.5.	4.5.	5.5.
^{95}Zr	4.4	6.3	9.3	0.6	7.0	20
^{95}Nb	0.6	0.8	9.0	1.3	8.2	18
^{99}Mo	3.7	2.6	2.0	4.4	2.8	3.7
^{103}Ru	2.1	3.0	4.1	7.2	6.9	14
^{106}Ru	0.8	1.2	1.1	3.1	1.3	9.6
^{131}I	5.6	6.4	5.7	25	8.2	19
^{132}Te	40	31	17	45	15	8.6
^{134}Cs	0.4	0.6	0.6	1.6	0.6	-
^{136}Cs	0.3	0.4	0.5	0.9	-	-
^{137}Cs	-	-	1.4	3.7	1.3	2.2
^{140}Ba	3.2	4.1	8.0	3.3	13	12
^{140}La	11	4.7	15	2.3	19	17
^{141}Ce	1.4	1.9	7.6	0.9	6.4	15
^{144}Ce	1.6	2.4	6.1	-	5.1	11
^{147}Nd	1.4	1.7	2.5	-	2.1	5.4
^{239}Np	23	3.0	11	0.6	2.8	6.8
Absolute total (mCi/m ³)	0.36	0.32	0.05	0.07	1.0	0.007

§ 3 ヨーロッパ地域における沈着量

放出された放射能は、4月末から5月始めにかけて、当初北欧諸国、次にヨーロッパ中央部各国、さらにはバルカン諸国、トルコなどで検出された。5月3日頃からは日本の各地でも検出され始め、その後北米大陸においても検出されている。放射能汚染は、北半球中高緯度地域ほぼ全体に及んだものと考えられる。ヨーロッパ地域の汚染は深刻で、牛乳・野菜の廃棄、ヨードカリ剤の投与などが大規模に行われた国もあった。汚染データは数多く報告されているものの、放射能沈着量についてのまとまった報告はいまだ不十分で、とりわけ最も深刻な汚染を受けたはずの東欧諸国については、断片的な情報しか得られていない。

汚染による長期的な放射線被曝を考えたときに最も問題となる核種は、 ^{137}Cs と ^{134}Cs である。ここでは、我々が測定したヨーロッパ各地の土壌試料データも含め、これまでに得られている各種の報告に基づいて、ヨーロッパ地域の各国における平均的な ^{137}Cs 沈着量の評価を試みる。用いるデータの種類は以下のようなものである。

a: ^{137}Cs 沈着量直接測定データ (水盤、土壌、草、in-Situ Ge測定)

b: 空間線量率データ

Sweden³⁾、Finland⁴⁾については国内の沈着量について詳細なデータが報告されている。ローカルな沈着量についての報告が得られている国は、FRG (西ドイツ)⁵⁾、Austria⁶⁾、

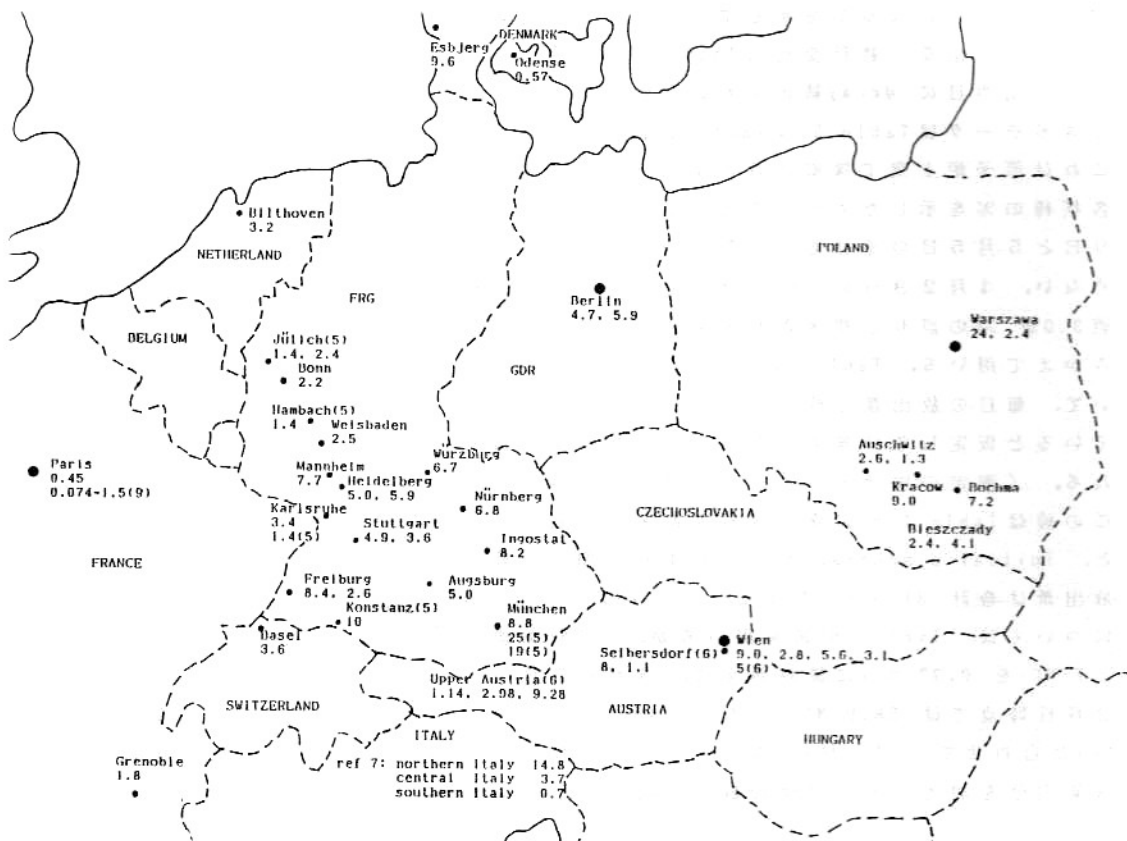


Fig. 1. ^{137}Cs activity (kBq/m^2) of soil samples from Europe measured by us and reported in literatures. Fallout from Chernobyl was not detected in samples from Portugal. Data are corrected for the thickness of soil. Numbers in parentheses indicate references.

Italy⁷⁾、Netherlands⁸⁾、France⁹⁾、United Kingdom¹⁰⁾などである。我々が土壌試料を入手した国は、Poland, FRG, Austria, Switzerland, France, DenmarkおよびPortugalである。ヨーロッパ中央部について、我々の測定結果と、報告されている ^{137}Cs 沈着量とをFig. 1に示す。沈着量の直接測定データが得られている国については、そのデータ分布に基づいて国内の平均的な ^{137}Cs 沈着量を算定する。

沈着量の直接測定データは得られていないものの、空間線量率のデータが報告されている国がある。Finlandのデータなどの検討から、空間線量率の増加は、その大部分が沈着した放射能によるものであることが明らかになっている¹¹⁾。Table 6は、沈着量測定値から計算した空間線量率と、実測値とを比較したものである。沈着放射能から空間線量率への換算には、米物理学会報告の係数¹²⁾を1/2にした値を用いた。空間線量率しか得られて

Table 6. Comparison of external dose rates measured and calculated from deposited activities

Site	Date	Measured depositions (kBq/m^2)			Dose rate ($\mu\text{R/h}$)	
		^{137}Cs	^{131}I	^{132}Te	calc.*	meas.**
Forssa (Finland)	29.4	4.65	48.7	39.8	54	54
Lieto (Finland)	29.4	8.88	105	98.3	125	135
Konala (Finland)	1.5	2.7	15.4	10.3	17	25
GSF (FRG)	1.5	19	92	120	164	100

* Including contribution from other nuclides not tabulated.

** Background has been subtracted.

いない東欧、バルカンなどの国については、沈着した核種の組成比を、他所のデータに基づいて仮定し、空間線量率に合うように沈着量を評価する。標準の沈着組成比には、FRG,MünchenのGSF⁵⁾で測定されたものを用いる。Fig. 2に、こうして¹³⁷Csの沈着量を評価した国のうち、Yugoslavia,BulgariaおよびCzechoslovakiaについて、空間線量データと計算値を比較したものを示す。

以上の方法で、ヨーロッパ地域各国の平均的¹³⁷Csの沈着量を評価し、まとめたものをTable 7に示す。各国の沈着量にその国の面積を掛け、足し合わせてヨーロッパ地域に沈着した¹³⁷Csの総量を求めると、 3.7×10^{16} Bq=100万Ci(上限250万Ci、下限43万Ci)となる。

§ 4 放射能沈着の全体像

この章の目的は、ソ連領内の放射能沈着値と、その外側の領域の沈着データをつなぎ合せて広い範囲の沈着量地図を描きだすことである。

この作業をやる上でまず障害となるのはソ連領内の生データの乏しさである。「報告書」には、沈着量の生データは数える程しかなく、しかも系統性がない。30 km圏内の沈着量として使えそうなデータは前にあげたTable 3,4とTable 8、

Table 8< Data from soil samples on 17.5.86 on the northern path of fallout within 30-km zone
Table 4.2>

Nuclide	Specific activity	
	Bq/g	Ci/km ²
¹⁴¹ Ce	3200	510
¹³² Te	340	54
¹³¹ I	3100	510
¹⁰³ Ru	3500	560
¹⁰⁶ Ru	960	150
¹³⁴ Cs	1600	250
¹³⁷ Cs	1700	270
⁹⁵ Zr	4000	640
¹⁴⁰ Ba	1800	290

であり、30km圏外ではKievとKalinin-gradについての沈着データTable 9<Table 5.5>だけ

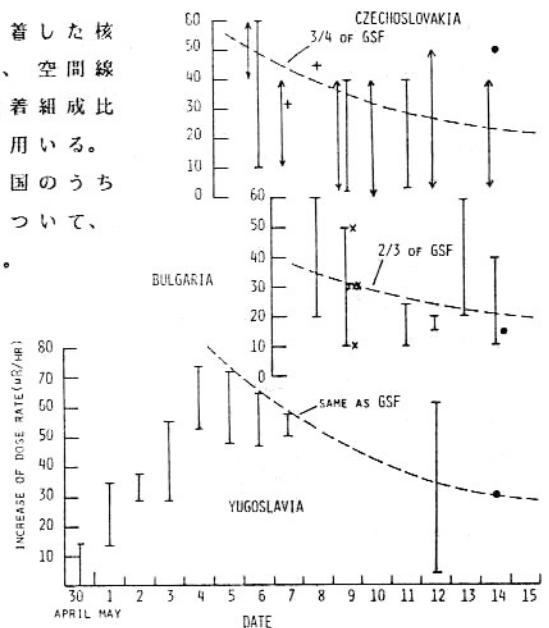


Fig. 2. External dose rate (BG-subtracted) in Yugoslavia, Bulgaria and Czechoslovakia. Calculated dose rates (dashed lines) are compared with the measured values. [and + are from ref.7) and ↓ and X are from ref.8) ● is measured by British embassy¹⁴⁾. Background is assumed to be 10 μR/h in each country. Maximum values are reported to be ~200, 150 and 60 μR/h in Czecho., Yugo. and Bulgaria, respectively, (date unreported). Deposition values from GSF report are shown in Table 6.

Table 9. Daily deposition (μCi/m²/d)

Date	Kiev				Kalininrad			
	¹³¹ I	¹⁴⁰ Ba	⁹⁵ Zr	¹³⁷ Cs	¹³¹ I	¹⁴⁰ Ba	⁹⁵ Zr	¹³⁷ Cs
26-27.4	-	-	-	-	0.020	0.0038	0.0038	0.0023
27-28.4	-	-	-	-	4.6	0.063	0.027	0.10
28-29.4	0.019	0.0019	0.0013	0.0011	4.9	0.051	0.038	0.084
29-30.4	0.066	0.0064	0.0023	0.0078	10.5	0.013	0.016	0.012
30.4-1.5	2.5	0.71	0.83	0.096	0.2	0.011	0.0043	0.0048
1-2.5	10.3	3.2	0.60	0.32	0.16	-	0.02	0.0032
2-3.5	2.6	0.86	0.57	0.092	0.04	0.013	0.0043	0.00092
3-4.5	0.33	0.22	0.25	0.011	0.024	0.0073	0.0075	0.001
4-5.5	0.78	0.10	0.22	0.023	0.016	0.0038	0.010	0.00073

この手法は§ 3でも使ったが、距離が近くなると¹³⁷Cs以外の核種の寄与が無視できな

くなり、どう
いう成分比で
沈着している
かが結果に大
きくひびいて
くる。そこで
まず、核種の
相対量の距離
依存性がどう
なっているか
調べてみた。
解析にあたっ
て、放出の期
間を便宜的に
2つに分ける
ことにする。
period 1は、
爆発と火災に
よって激しく
放出が行われ
た最初の1日
で、この期間、
風は北西方向
に吹いたため、
600 km圏内の

Table 7. Estimates of ^{137}Cs deposition in European countries

国名	^{137}Cs 沈着量 (kBq/m ²)	誤差因子*	算定方法
Finland	6.7	1.5	ref. ⁴⁾ によると平均被曝線量はUusikaupunkiの1/3。Uusikaupunkiの沈着量を、Poriでの測定値より20kBq/m ² とした。
Sweden	4.8	1.5	ref. ³⁾ のデータを基に、24地方の沈着量測定値を平均した。
Norway	4.8	2	Swedenと同じにした。
Poland	11	2	Fig.1より中部(人口50%)の沈着量を8kBq/m ² 、南部(25%)はその1/2とした。ref. ¹³⁾ によると、北部(25%)の被曝は中部の3倍なので沈着も3倍として平均した。
Czechoslovakia	14	3	空間線量率データ ^{7,8,14)} を用いて、GSF (^{137}Cs ;19kBq/m ²)の3/4倍の沈着と見積った(Fig.2)。
Hungary	6.3	3	空間線量率データ ^{8,14)} を用いて、GSFの1/3倍。
Romania	48	3	" ¹⁴⁾ を用いて、GSFの2.5倍。データは1ヶのみ。
Bulgaria	13	3	" ^{7,8,14)} を用いて、GSFの2/3倍(Fig.2)。
Greece	6.3	3	" ⁸⁾ を用いて、GSFの1/3倍。
Yugoslavia	19	3	" ^{7,14)} を用いて、GSFと同じ(Fig.2)。
Albania	9.5	3	空間線量率最大値 ⁸⁾ の比較より、Yugoslaviaの1/2にした。
Austria	12	1.5	国内43ヶ所の空間線量率データ ¹⁵⁾ (4 May)では、平均値はWienの3倍。空間線量率データ ¹⁵⁾ を用いた見積りと沈着測定値(Fig.1)より、Wienの沈着量を4kBq/m ² とした。
Switzerland	3.6	2	Baselの土壌試料測定値。
GDR	5.3	2	Berlinの土壌試料測定値。
FRG	4.8	1.5	Fig.1より北、中、南部の沈着量を、10,5,2kBq/m ² とし、重みを4:4:2として平均した。
Denmark	2.0	2	空間線量率データ ¹⁶⁾ とKUR測定値により評価。
Netherland	3.2	2	Billthovenでの沈着量測定値 ⁸⁾ 。
Belgium	3.2	2	Netherlandと同じにした。
Luxembourg	3.2	2	Netherlandと同じにした。
Italy	4.7	1.5	ref. ⁷⁾ の北、中、南部の沈着量(Fig.1)を、重み2:4:4で平均した。
France	0.7	2	GrenobleとParisの土壌測定値を1:4の重みで平均した。
UK	1.0	2	ref. ¹⁸⁾ より、Scotlandとそれ以外の沈着を、5と0.03kBq/m ² とし、1:4の重みで平均。
Ireland	1.0	2	UKと同じにした。
Turkey	1.0	3	Edirneでは、空間線量率データ ¹⁷⁾ を用いるとGSFの1/4倍。国内平均はEdirneの1/5とした。

* 推定値の確かさを、大まかに見積った係数。上限；掛算、下限；割算。

北西部および SwedenとFinlandなどに沈着が起こった。period 2は、そのあとの9日間で、放出の態様は比較のおだやかで、かつ風は西、南、東に吹いたために、東欧、西欧、南欧、中近東、ソ連の東部などに沈着をもたらした期間である。

ある地点の測定データにおいて、核種*i*の値を Q_i とし、それらを ^{137}Cs の値で割ったものを R_i とする。さらに inventoryでの核種*i*の ^{137}Cs に対する比を R^0_i とし、 R_i を R^0_i で割ったものを r_i とする。

$$R_i = Q_i / Q_{^{137}\text{Cs}}, \quad R^0_i = Q^0_i / Q^0_{^{137}\text{Cs}}, \quad r_i = R_i / R^0_i \quad (1)$$

このようにすると、化学的に似かよった核種は、共通の r_i をもつと考えられ、沈着についての挙動も一括して考えることができる。このグループ分けは、WASH-1400¹⁸⁾に従って、NO (Nonvolatile Oxides), VO (Volatile Oxides), I (Iodines), TE (Telluriums), AE (Alkaline Earths)の5種にし、さらに ZR (Zirconiums)をNOと別に扱う。というのは、Zrはチャンネル構造材として大量に使われており、その放射化によるactivityが無視できないと思われるからである。Table 10に29の核種に対するグループ分けとその inventory, R^0_i などを示す。

前述したデータを整理して period 1 と 2 に分けて図示したのが Fig. 3

a, b である。30 km 圏内の period 1 については、Table 8 のデータを用いた。30 km 圏内の period 2 については、Table 4 のデータから、period 1 の寄与を差し引いて用いた。データ不足のために r_1 のグラフはそうとうあらいが、この図から次のことが言える。

1. period 1 と 2 で r_1 は似た振舞いをするが、period 2 の方が 4 倍ほど大きいことから見て、 ^{137}Cs

の量が period 2 では相対的に少ない。

2. ZR と NO はほとんど同じ挙動を示すことから、放射化成分のジルコニウムの寄与はあまりない。

3. 6 つのグループは、次の 3 つに分類できるように見える。1 つは I と TE で r_1 の値が大きく、しかも long component が大きい。2 つ目は VO と AE で、30 km 圏内での r_1 は NO とあまり変わらないが、short component が NO に比べて大きく、long component は I と TE のグループより小さい。3 つ目は NO で極めて速く減衰する。

これら r_1 に対して、2 つの成分の指数関数

$$r = r_s \exp(-x/x_s) + r_l \exp(-x/x_l) \quad (2)$$

で表すことにし、Fig. 3a, b にできるだけ合うようにパラメータ r_s, r_l, x_s, x_l を決める。

Table 10. Inventory (on 26.4.86) and its ratio R^0 to the quantity of ^{137}Cs

Nuclide	Group	$T_{1/2}$ (d)	Inventory (NCi)	R^0
^{89}Sr	AE	52.1	63.1	8.2
^{90}Sr	AE	11030	5.5	0.71
^{90}Y	NO	2.67	3.9	0.51
^{91}Y	NO	59	120	15.6
^{95}Zr	ZR	65.2	132	17
^{97}Zr	ZR	0.72	150	19
^{95}Nb	NO	35	150	19
^{99}Mo	VO	2.8	155	20
^{103}Ru	VO	39.5	131	17
^{106}Ru	VO	366	56.2	7.3
^{105}Rh	VO	1.50	58	7.5
^{127}mTe	TE	109	1.1	0.14
^{131}mTe	TE	1.25	13	1.7
^{132}Te	TE	3.25	73.1	9.5
^{127}Sb	NO	3.88	6.1	0.79
^{131}I	I	8.05	86.4	11.2
^{133}I	I	0.875	170	22
^{134}Cs	CS	750	5.05	0.66
^{136}Cs	CS	13.0	3.0	0.39
^{137}Cs	CS	11000	7.7	1
^{140}Ba	AE	12.8	132	17
^{140}La	NO	1.67	160	21
^{141}Ce	NO	32.3	150	19
^{143}Ce	NO	1.38	130	17
^{144}Ce	NO	284	88	11.4
^{143}Pr	NO	13.7	130	17
^{147}Nd	NO	11.1	50	7.8
^{239}Np	NO	2.35	1640	213
^{241}Pu	NO	5350	4.7	0.61

Table 11. Adopted values for the parameters r_s, r_l, x_s and x_l

Group	Period 1				Period 2			
	r_s	x_s (km)	r_l	x_l (km)	r_s	x_s (km)	r_l	x_l (km)
ZR	0.18	320	0.0018	∞	0.70	160	0.0070	∞
VO	0.20	320	0.0020	∞	0.80	160	0.0080	∞
NO	0.10	500	0.0176	-4450	0.60	500	0.060	-4450
I	2.7	400	0.40	-4200	2.7	400	0.40	-4200
TE	0.7	400	1.0	-11000	1.1	400	1.0	-11000
AE	0.17	400	0.04	∞	0.7	400	0.04	∞

Table 12. Estimated deposition concentration of ^{137}Cs in 600-km zone

Region	Distance in km (Direction)	Period	Air dose ($\mu\text{R/h}$)	Dep. Conc. of ^{137}Cs (kBq/m^2)
<Table 4.1>	26.6.86			
	17(-)	1+2	20000	6681
	21(-)	1+2	10000	3387
30-km zone	28(-)	1+2	5000	1734
	41(-)	1+2	3000	1086
<Table 7.2.5>	11.5.86			
Gomelskaya	160(NNE)	1	830	211
Kievskaya	100(S)	2	440	48.7
Bryanskaya	350(NE)	2	300	65.4
Zhitomirskaya	160(SW)	2	200	26.9
Mogilevskaya	290(N)	1	150	46.7
Orlovskaya	430(NE)	2	140	35.5
Chernigovskaya	90(E)	2	140	15.0
Tul'skaya	550(NE)	2	120	36.4
Cherkasskaya	270(SSE)	2	91	16.6
Brestskaya	440(W)	2	81	20.9
<Table 7.2.9>	11.5.86			
Cent. of Ukraine	150(S)	2	154	20.1
W. of Ukraine	370(W)	2	38.3	8.7
E. of Ukraine	570(E)	2	44.0	13.7
S. of Ukraine	400(S)	2	25.7	6.1
SE of Byelorussia	180(N)	1	560	147
NW of Byelorussia	370(NW)	1	53.7	18.6
Moldauskaya	420(S)	2	48.0	12.0
Bryanskaya	350(NE)	2	286	62.3
Kaliningrad	680(NW)	1	6.9	3.3
Kal. Tul. Smolensk	500(NE)	2	68.6	19.4
Orl. Kursk, Lipetsk	520(E)	2	80	23.3

* Period 1+2 means the weighting factors for the periods 1 and 2 are 4/7 and 3/7, respectively.

s, l はそれぞれ short, long range の component を意味する。我々の用いたパラメータの値は Table 11 に示す。ここでの主眼は 600km 圏内であるが、Kumatori の良質のデータ¹⁹⁾があるので、これを long range 成分の挙動の見当をつける上で参考にした。

Table 11 のパラメータを用いると任意の距離での沈着放射能の成分が決まるから、これをもとに空間ガンマ線量から沈着量を定めることができる。沈着濃度から空間線量に換算する係数は § 3 と同じである。空間線量のデータは、Table 3 の他にいくつかあるが、30km 圏外のもので、Table 7.2.5 と Table 7.2.9 を用いた。これらのデータと、 ^{137}Cs 沈着濃度の計算結果を Table 12 に示す。

これらの数値と共に沈着量の実測値を図示したのが Fig. 4 で、ヨーロッパのデータも含めて、 ^{137}Cs の沈着濃度のばらつきは相当大きいのがみてとれる。図からわかることは、300 km 以遠では period 1 と 2 のちがいほとんど見られないが、300 km 圏内では period 2 の方が 1 より速い減衰を示すことがわかる。この図から、 ^{137}Cs 沈着濃度 $G(x)$ (kBq/m²) の距離依存として次の 3 成分の指数関数を考える、

$$G = G_1 \exp(-x/x_1) + G_2 \exp(-x/x_2) + G_3 \exp(-x/x_3) \quad (3)$$

period 1 と 2 の違いは、 G_1, x_1 についてだけ考慮し、他のパラメータは period 1 と 2 で同じとする。 G_3, x_3 については、測定点が Kumatori の一点しかなく、大雑把な見積りになるが、8000km の遠方まで全方向一様に沈着しているはずはないので、一応データの値を 1/2 に減らし、かつ x_3 の値を仮に 2000(km) としておく。採用したパラメータ値は Table 13 にまとめている。

G の式 (3) に (2) 式と $2\pi x$ をかけて積分すると、任意の帯域での沈着量がきまる。全方位の 1/4 は period 1, 3/4 は period 2 に対応するようにしているので、各 period の積分値をこ

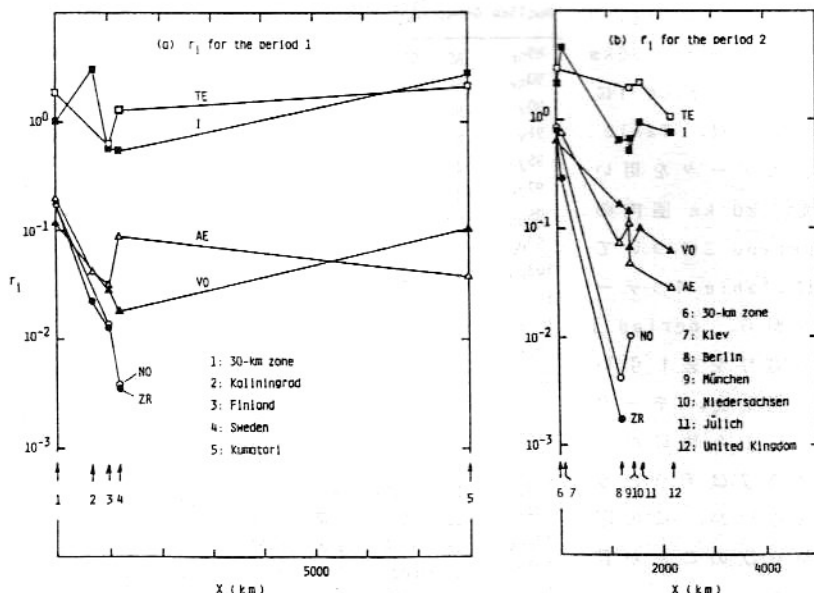


Fig. 3. Plots of r_i vs. x_i ; (a) for the period 1 and (b) for the period 2.

Table 13. Adopted values for the parameters $G_{1,2,3}$ (kBq/m²) and $x_{1,2,3}$ (km)

	G_1	G_2	G_3	x_1	x_2	x_3
Period 1	13000	45	2.05	35	640	2000
Period 2	10000	45	2.05	14	640	2000

Table 14. Estimated depositions in various zones on 6.5.86. Values are given in 10^{15}Bq (in MCi).

	0-30 km	30-600 km	600-3000 km
^{131}I	159 (4.3)	512 (13.8)	355 (9.6)
^{137}Cs	11.3 (0.31)	52.8 (1.4)	103 (2.8)
Total	911 (25)	2074 (56)	1201 (32)

の按分比で加え合せて各距離帯域での沈着総量とした。3つの帯域について計算した結果の内、 ^{131}I と ^{137}Cs と全核種の和について示したのがTable 14である。3000kmまでの全核種についての積分値はTable 15に示す。積分を3000kmで止めたのは、これ以遠での信頼性に問題があるからである。

30km圏内の沈着量は、 ^{137}Cs については「報告書」の数値 (Table 4) の $2.8 \times 10^5 \text{ Ci}$ とよく一致しているが、 ^{131}I については、Table 4の数値 (5月6日に換算すると2M Ci) とくらべて2倍程大きく評価している。この理由は、1に対する

rの評価に際して、Fig. 3a, bの30 km圏内のr値 (これはTable 4に基づく) が特異的に小さいからである。

§2で述べたように「報告書」の放出量というのは、600 km圏内に沈着した総量のことであり、これは50M Ciとされていた。我々の今回の計算によると、600 km圏内では81 M Ciとなり60 %大きな値となった。3000 kmまでの沈着量では113 M Ciとなり、50 M Ciの2.3倍にもなる。§3でヨーロッパ全域の ^{137}Cs の沈着量は1 M Ci程度と評価したが、600 - 3000km範囲の積分値2.8M Ciの1/3程度であり、我々の評価方法が一応reasonableであることがわかる。核種別の3000 kmまでの総沈着量とinventoryとの関係はTable 15に示す。今回の事故は、WASH-1400で想定されている最大規模の事故さえ上回る放射能を環境に放出した。

§5 被曝線量とガン死数の見積り

事故の長期的な影響を考えたとき、半減期ならびに飲食物への移行のし易さから、最も問題となる汚染核種は ^{137}Cs と ^{134}Cs である。§4および§3での議論より、ソ連領600km

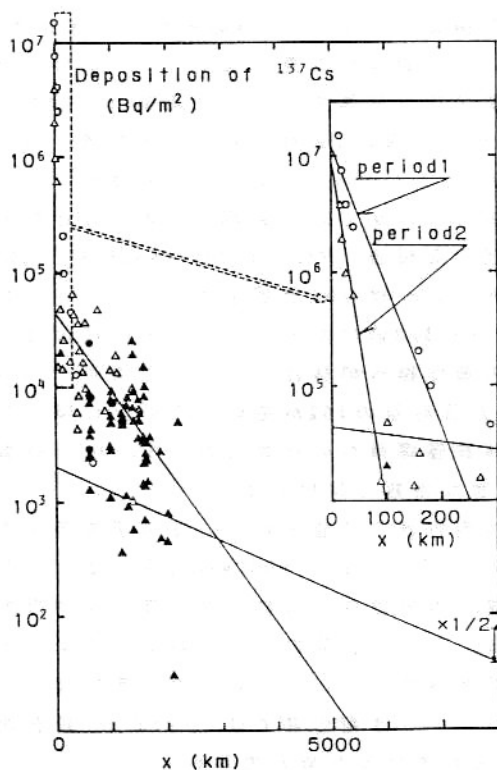


Fig. 4. Deposition concentrations ^{137}Cs plotted vs. x; circles for the period 1 and triangles for the period 2. Close or open marks indicate values measured or calculated from y-dose rates, respectively.

Table 15. Estimated depositions in 3000-km zone on 6.5.86

Nuclide	10^{15}Bq	(M Ci)	% of the inventory
^{89}Sr	193	(5.2)	9.4
^{90}Sr	19	(0.51)	9.4
^{90}Y	0.57	(0.015)	5.3
^{91}Y	207	(5.6)	5.2
^{95}Zr	202	(5.5)	4.6
^{97}Zr	0.014	(0.0004)	4.5
^{95}Nb	233	(6.3)	5.1
^{99}Mo	48	(1.3)	10
^{103}Ru	410	(11)	10
^{106}Ru	206	(5.6)	10
^{105}Rh	2.1	(0.057)	10
^{127}mTe	30	(0.80)	78
^{131}mTe	1.5	(0.041)	80
^{132}Te	254	(6.9)	79
^{127}Sb	2.0	(0.053)	5.2
^{131}I	1027	(28)	76
^{133}I	1.7	(0.047)	76
^{134}Cs	109	(2.9)	59
^{136}Cs	38	(1.0)	59
^{137}Cs	167	(4.5)	58
^{140}Ba	265	(7.2)	9.3
^{140}La	4.9	(0.13)	5.3
^{141}Ce	230	(6.2)	5.1
^{143}Ce	1.7	(0.045)	5.3
^{144}Ce	166	(4.5)	5.2
^{143}Pr	153	(4.1)	5.3
^{147}Nd	62	(1.7)	5.2
^{239}Np	167	(4.5)	5.2
^{241}Pu	9.1	(0.24)	5.2
Total	4186	(113)	9.9

圏内の各地域とヨーロッパ各国について、 ^{137}Cs の平均的な沈着量が得られる。 ^{134}Cs の沈着量は ^{137}Cs の半分である。平均的な沈着量に基づいて、この2つの核種からの長期間にわたる被曝、つまり集団線量預託を計算すると、ソ連領600km圏内10地域（人口7450万）では、約1億5000万人レム（内部被曝；1億3000万、外部被曝；2500万）となる。一方、ヨーロッパ24ヶ国（人口4億9000万）については、約7200万人レム（内部被曝；4100万、外部被曝；3100万）となり、両方合わせて約2億2000万人レムとなる。沈着量から被曝量を求めるための係数は、米物理学会報告、WASH-1400、UNSCEAR 1982年報告²⁰⁾、ソ連報告書を基に決定した。600km圏内とヨーロッパ地域を比べると、外部被曝はほぼ同じであるが、内部被曝では、600km圏内の方が約3倍になっている。その理由は、ソ連報告書によると、他の土壤に比べ一桁以上Csの農作物への移行の大きい土壤が、UkraineとByelorussia地方にあり、600km圏内に沈着した放射能の10%がその土壤の上に降ったとされているためである。従って、沈着量から内部被曝線量への計算において、600km圏内では、ソ連報告書を基にヨーロッパより約4倍大きな係数を採用してある。

§ 2で述べたように、ソ連報告書で評価されている集団被曝線量は、外部被曝2900万人レム、内部被曝2億1000万人レムである。600km圏内沈着量の我々の評価は、ソ連報告書の1.6倍であるが、外部被曝、内部被曝ともに、被曝量はソ連報告書の方が大きい。その理由は、外部被曝については、我々の計算の方が建物などによる遮蔽効果を大きく見積っているためと思われる。内部被曝については、我々の計算では、600km圏内に住んでいる7450万人しか考慮していないが、ソ連報告書では、Ukraine穀倉地帯の農作物を食べている600km圏外の人々の被曝も入れているためと思われる。

次に、我々が評価したソ連・ヨーロッパでの集団線量値、2億2000万人レムを用いて、これから将来生ずるであろうガン死の数を見積ってみよう。放射線ガン死の危険度、つまりリスク係数については、さまざまな値が提唱されている。今中の評価²¹⁾によると、リスク係数は100万人レム当り600～2000件であり、ガン死数は13万～42万件となる。また、ICRPのリスク²²⁾を用いると、ガン死数は2万2000件となり、Gofmanの提唱しているリスク²³⁾では、約90万件となる。

§ 6 おわりに

チェルノブイル事故により放出された放射エネルギーとその影響に関して、利用できるかぎりのデータを用いて評価を試みた。もちろん、我々が入手できたデータは十分とは言えないし、得られた結果がperfectなものとは考えていない。ソ連報告書のデータの詳細や抱えている矛盾の説明については、昨秋よりソ連当局者に問い合わせをしているが、いまだ回答はない。日本においては、原子力安全委員会の調査委員会が事故調査報告書²⁴⁾を明らかにしているが、今回の作業に利用できる新たな情報は何も見出せなかった。チェルノブイル事故は、これまで机上で議論されてきた原発の破局的大事故が、現実となったものである。原子力開発に対する社会的思惑によって、事実の解明がおろそかにされてはならない。

本稿をまとめるにあたって、原子力資料情報室の高木仁三郎氏、朝日新聞の団藤保晴氏その他多くの方々から貴重な資料を頂いたことに感謝します。

References

- 1)USSR State Committee on the Utilization of Atomic Energy;"The accident at Chernobyl nuclear power plant and its consequences"(Aug.1986).
- 2)"INSAG Summary report of the post-accident review meeting on the Chernobyl accident"(30 Aug.-5 Sep.1986).
- 3)Private Communication from G.E.Elicsson, Nat.Inst.Rad.Prot.,Sweden.
L.Devell et al;NATURE,321,pp192-193(1986).
M.Jansen & J.C. Lindhe;IAEA BULLETIN,Autumn 1986,pp30-32.
"Chernobyl-its impact on Sweden",SSI-rapport 86-12 (1 Aug.1986)
"Radioactivity in Foodstuffs in Sweden following in Nuclear Power Station Accident at Chernobyl",Nat.Food Administration,Sweden (10 July 1986)
- 4)Finnish Cent. for Rad. and Nucl. Safety;STUK-B-VALO 44 & 45(May 1986).
- 5)GSF-Bericht 16/86,München,FRG (15 June 1986).
C.Hohenemser et al.; "An Early Report on the Reactor Accident at Chernobyl", preprint for ENVIRONMENT(July 1986).
H.Kiefer; "Auswirkungen des Reaktorunfalls in Tschernobyl", Kernforschungs-zentrum Karlsruhe(June 1986).
"Die Folgen von Tschernobyl",3.erweiterte Auflage,Heidelberg,Juni 1986.
- 6)R.Schelenz and A.A.Abdel-Rassoul; IAEA BULLETIN,Autumn 1986,pp23-6.
- 7)Information from Italian Embassy in Tokyo.
- 8)Information from WISE, Amsterdam, 3 & 11 June 1986.
- 9)A.J.Thomas & J.M.Martin; NATURE,321,pp817-9(1986).
- 10)F.A.Fry et al.;NATURE,321,pp193-5(1986).
- 11)瀬尾健・今中哲二; 第26回原子力安全問題ゼミレジュメ(19.12.1986).
- 12)American Physical Society;Rev.Mod.Phys. 47 Suppl.1(1975).
- 13)Z.Jawrowski;IAEA BULLETIN,Autumn 1986,pp33-4.
- 14)G.A.M.Webb et al.;NATURE,321,pp821-2(1986).
- 15)Private communication from P.Weish to J.Takagi(May 1986).
- 16)H.P.Ryder;reports of National Agency of Environmental Protection, Denmark(5,11&29, May 1986).
- 17)Information from Turkish Atomic Energy Authority(May 1986).
- 18)USNRC;"Reactor Safety Study",NUREG-75/014,WASH-1400(Oct.1975).
- 19)T.Imanaka and K.Koide;J.Environ.Radioactivity 4 pp149-153(1986).
- 20)UNSCEAR 1982 report,United Nations (1982).
- 21)今中哲二; 公害研究 Vol.16 No.2 pp47-56 (1986).
- 22)ICRP Publication 26 (1977).
- 23)J.W.Gofman;"Radiation and Human Health",Sierra Club Books (1981).
- 24)原子力安全委員会ソ連原子力発電所事故調査特別委員会; 第1次報告書 1986年9月9日

RADIOACTIVITY RELEASE FROM THE CHERNOBYL - 4 REACTOR ACCIDENT

Takeshi Seo, Toru Ebisawa, Tetsuji Imanaka, Shinji Kawano,

Keiji Kobayashi and Hiroaki Koide

(Research Reactor Institute, Kyoto University, Osaka 590-04)

Sanshiro Kume

(Faculty of Science, Osaka University, Osaka 560)

The USSR report "The Accident at the Chernobyl' Nuclear Power Plant and Its Consequences", Annexes 4-7 were reviewed. A number of fallout data reported in literatures together with those obtained by our measurements of samples from Europe were also investigated. Measured deposition concentrations of different nuclides were analyzed with respect to their ratios to the ^{137}Cs quantity and the x-dependence of the ratios has been determined. By combining their x-dependence with the available values of ^{137}Cs deposition, that were most widely measured, the deposition concentration of each nuclide has been obtained as a function of x. By integrating these functions, the total amount of radionuclides deposited on 3000-km zone around Chernobyl has been estimated to be $\sim 4.8 \times 10^{18}$ Bq on 6.5.86, which is more than twice as high as the total amount of the radioactive releases, 1.85×10^{18} Bq reported by USSR State Committee.