

理論物理計算が示す原発事故の真相

1. 大気への放射性物質の毎日の放出量
2. 海域への放射性物質の毎日の放出量
3. チェルノブイリや他事故との比較
4. 水素爆発事故に至る詳細な経過の完全解明
5. 研究結果からいえる「大災害の主要原因」

西 村 肇
神 足 史 人

大気への放射性物質の 毎日の放出量

■目的■ 大気を通じての放射性物質の1日当たりの放出量を推算する。

■方法■ 大気汚染計算は、通常、汚染物質の排出量を入力とし、拡散方程式を適用して地上の汚染物質濃度を求めるものであるが、ここでは逆に各地の環境放射能レベルを入力とし、拡散方程式を逆に適用することによって、1日当たりに放出されている放射性物質の量を推定する。

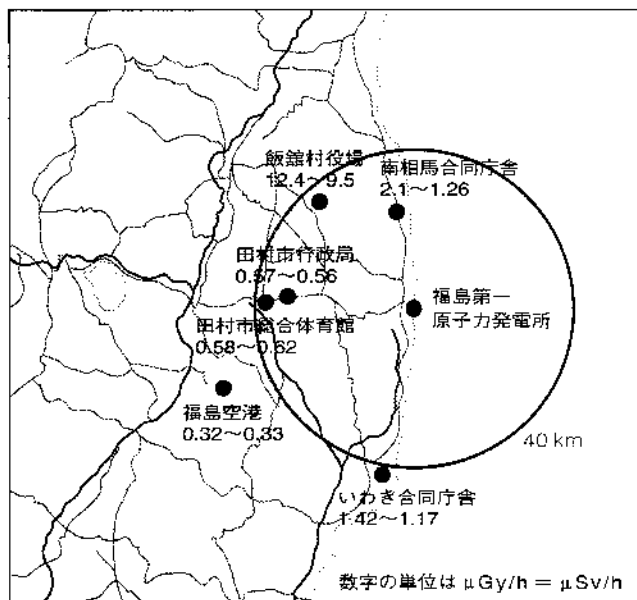


図1 福島県内各地方の環境放射能測定値 (3月24日17時~25日22時の暫定値。福島災害対策本部発表)

■入力となる各地の放射能レベル■ 放射能レベルの連続的監視が行われている地点のうち、福島第一原子力発電所から約40 kmの距離にある7地点を選んで、3月24日、25日両日の放射能レベルを示すと、図1になる。汚染は放出点から一様に広がっているのではなく、風道にあたる場所に高い濃度が現れる。飯館村はそのような風道の上にある。原発と飯館村を結ぶ風道の直線から10 km程度しか離れていない南相馬では飯館に比べて濃度が極端に下がっていることからみて、この地点での風道の幅は、幅4~6 kmとみられる。

■適用する拡散モデル■ 拡散モデルにはパフモデルとブルームモデルがあるが、図1の汚染レベルの分布からみて、風速2~5 mのブルームモデルを適用する(文献1)。ブルームとは煙のことである。ブルームモデルでは、煙は風下の方向(x軸)に向かって幅(y軸)と高さ(z軸)を増しながら広がる。そのx軸に沿ってのブルームの幅 σ_y と高さ σ_z の変化の仕方は、風や気象条件によって変わるが、その様子は図2にまとめられている。

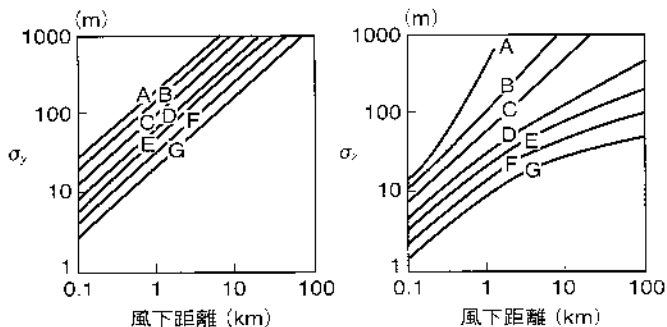
■放出量の推算■ 放出量 Q は、ブルームの高さ $2\sigma_z$ と幅 $2\sigma_y$ に流速 v と平均濃度 C_{av} をかけて求められる。

$$Q = 4\sigma_z \sigma_y v C_{av}$$

ブルーム内の濃度はガウス分布

$$\exp\left\{-\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right\} \exp\left\{-\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right\}$$

で近似できるが、平均濃度はブルームの中心から高さ σ_z 、幅 σ_y のところに現れる。観測している点は地上なので、ブルームの中心から σ_z 下がったところが地表と接する地



A ~ Gは表1の脚注参照

図2 安定度Gに対する拡散幅を加えたパスキル・ギフォード (Pasquill-Gifford) 線図 (文献1)

点で、平均濃度が観測される。それより排出源に近いところでも離れたところでも、濃度はこれより小さくなる。

まず排出煙源の高さ H を推定する必要があるが、原発から立ち昇る水蒸気の「湯気」から判断すると、原発建屋の5~6倍になる。建屋の高さは約50 mなので300 mと推定する。

つぎに σ_z を推定し、 σ_z が排出煙源の高さ H に等しくなる地点を探す必要がある。 σ_z は表1に示すように煙源からの距離 x と気象条件から決まる安定度に依存する。3月24日、25日のデータを使うことにすると、気象条件は風速2~3 m/s、当日は曇り小雨で、安定度はDとみなせる。図2の右からの σ_z が250 m程度の地点の x を求めると、40~100 kmがそれにあたる。図1の40 kmにある観測地点のうち、飯館村がその条件にあった地点とみなせる。そこで飯館村の観測地をブルームの平均濃度として採用する。 $x=40$ kmとして、この地点の σ_x 、 σ_y を求めると、 $\sigma_x=100$ m、 $\sigma_y=1000$ m、 $v=2$ m/s $=2 \times 10^5$ m/dとすると、

$$4v\sigma_x\sigma_y = 4 \times 2 \times 10^5 \times 10^2 \times 10^3 = 8 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{d}$$

この大気中の放射物濃度Bq/m³をつぎのように推算する。測定点の人体組織に影響する放射線影響強度 $\mu\text{Sv/h} = \mu\text{J/kg h}$ は、測定点の観測値からわかっている。図1からブルームが通過する飯館村の放射線影響強度は10 $\mu\text{Sv/h}$ である。この影響はほとんどすべて放射性物質を含んだ空気を呼吸したことによる影響としてよい。呼吸に起因する放射線影響強度 ($\mu\text{Sv/h}$) と、定常的に呼吸する空気に含まれて1日当たりに体内に取入れる放射性物質の量はほぼ確定しており、放射性物質がヨウ素131の場合、1 Bq $=7.4 \times 10^{-3}$ $\mu\text{Sv h}$ あるいは1 $\mu\text{Sv/h} = 130$ Bqである。

影響強度1 $\mu\text{Sv/h}$ の地点の空気中の放射物濃度Bq/m³を知るには、上の値を人間の呼吸量 (1日5~10 m³) で割れ

表1 日本式パスキル安定度階級分類法 (文献1)

風速(地上10 m)/m/s	<2	2~3	3~4	4~6	6<
H射量(cal/m ² /h)					
≥ 50	A	A~B	B	C	C
49~25	A~B	B	B~C	C~D	D
≤ 24	B	C	C	D	D
本雲(8~10) (日中・夜間)	D	D	D	D	D
夜間					
上層雲(5~10)	(G)	E	D	D	D
中・下層雲(5~7)	(G)	F	E	D	D
雲量(0~4)	(G)	F	E	D	D

A: 強不安定, B: 並不安定, C: 弱不安定, D: 中立, E: 弱安定, F: 並安定, G: 強安定
 "大気汚染濃度予測ならびに雨量予測手法のシステム開発研究報告書", 日本気象協会 (1977) による。

ばよい。したがって呼吸によって1 $\mu\text{Sv/h}$ の影響が出ているときの大気中の放射物濃度は130/10 Bq/m³ $=13$ Bq/m³である。

飯館村の場合、影響強度は10 $\mu\text{Sv/h}$ であるから大気中の放射物濃度は130 Bq/m³である。ブルームの空気体積が 8×10^{10} m³/dで平均濃度は130 Bq/m³であるから、放射物質の1日の放出量は130 Bq/m³ $\times 8 \times 10^{10}$ m³/d $=10^{13}$ Bq/d $=10$ TBq/dである。

この10 TBq/dの放射能のうち、深刻な影響を与えるのは¹³⁷Csである。したがって、元素別放射能分析の結果から¹³⁷Csの割合を決める必要がある。飯館村の土壌検査の結果 (3月23日) では、ヨウ素¹³¹Iは1.17 MBq/kg、セシウム¹³⁷Csは0.16 MBq/kgであった (比は1:0.15)。したがって、10 TBq/dのうち約15%が¹³⁷Cs出来とみてよい (T(テラ)は10¹²)。

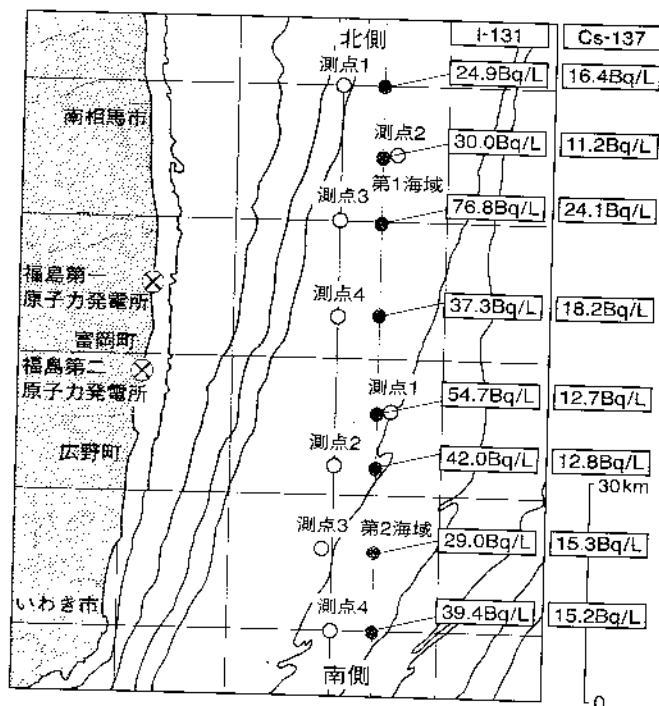
海域への放射性物質の 毎日の放出量

■目的■ 海域への放射性物質の1日当たりの放出量を推算する。

■方法■ 二つの方法で行う。第一は、排水口から放出量の直接推算で排水量 G m³/dと排水中濃度 C から1H当たりの放出量 $Q=GC$ として推算する。

第二は、沖合30 kmでの海水の放射線量調査を入力データにし、海洋の拡散方程式を逆適用して福島原発からの1H当たりの放出量の推定を行う。

■拡散方程式■ 海洋における汚染物質の拡散は、海流による移送と乱流拡散に従う乱流拡散は、水平方向と垂直方向の二つがあり、両者とも潮流、風波などに影響される。したがって厳密な拡散方程式を立てることはできるが、それに必要な乱流拡散係数の推定は、よほど観測を繰



東西30 km, 南北60 kmの矩形を濃い青色で示した。これが等濃度線の広がり区域。

図3 福島第一原子力発電所周辺の海水中の放射能濃度 (測定試料は3月23日に採取, 文部科学省発表)

返した地域以外は不可能である。

これに対し, 西村は1970年, 瀬戸内海の汚染原因研究のため拡散係数の値を知る必要にせまられ, つぎの方法でそれを解決した。つまり各地の河川から海に流入する淡水を海への汚染物質のように考え, 河口を中心に広がる淡水濃度の分布のデータを多数集め, 単純化した拡散方程式でそれを整理し, 水平方向拡散係数を求めた。海域の違い, 海洋気象条件の違いがあるため, その値は大きく異なったが, その範囲は一桁の内におさまリ, 汚染物質の排出量と濃度の関係は次式で表されることを発表した (文献2)。

$$C = (10^{-3} \sim 10^{-4}) (L/S)$$

ここでCは濃度, Lは排出量 (kg/d), SはCの濃度の等濃度線の広がり面積 (km²) である。この係数 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ は水平方向拡散係数の逆数であるが, 実際には垂直方向拡散を含んだもので, 外洋ではこの値は小さくなる。

この式はその後, 水俣湾内のメチル水銀の濃度にも使われ, よく合うことが確かめられている。

■排水中濃度からの推算■ 3月21日, 原発排水口の南800 mの地点で 3×10^4 Bq/kgの放射能が測定された。21, 22日の放水量は両日とも200 tであった。これによって推算すると,

$$Q = CG = 3 \times 10^4 \text{ Bq/kg} \times 200 \times 10^3 \text{ kg/d} \\ = 6 \times 10^9 \text{ Bq/d} = 6 \text{ GBq/d}$$

■拡散方程式による推算■ 30 km沖合の観測データは図3から福島第一原発から東方沖合に30 km, 南北沖合にそれぞれ30 kmの30 km × 60 kmの矩形を考えると, その周縁部の観測濃度の平均値はヨウ素44 Bq/L, セシウム16 Bq/Lで計60 Bq/Lとなる。この観測値に簡易拡散方程式を適用して3月23日の放出量を推算する。係数は上述の理由から 10^{-4} をとる。

$$L = \frac{1}{10^{-4}} CS$$

$S = 30 \times 60 = 1800 \text{ km}^2$ とすると,

$$L = 10^4 \times 60 \text{ CS} = 10^4 \times 60 \times 1800 \\ = 10^4 \times 0.6 \times 10^2 \times 2 \times 10^3 \\ = 10^9 \text{ Bq/d} = 1 \text{ GBq/d}$$

このうち, ¹³⁷Csの寄与は $16/60 = 27\%$ で, およそ0.3 GBq/dである。

チェルノブイリや他事故との比較

放射性物質の放出量が比較できる事故としては, 旧ソ連のチェルノブイリ事故, 米国のスリーマイル島事故, ロシア・トムスクでの燃料再処理工場の事故がある。

このうち放出量が公式に報告されているのは, トムスクの事故のみである。これは国際原子力機関 (IAEA) の発表によると¹³⁷Csの総放出量は大気中に505 GBqであった。

スリーマイル島事故 (1979年3月28日) では, ヨウ素131 (¹³¹I) の総放出量が481 ~ 629 GBqであったとの記述があるが, 公式機関の発表でもなく, 科学雑誌への報告でもなく, Walkerという一種の告発本の記述であり, 十分には信用できない。チェルノブイリ事故は事故というより核爆発であり, 放出量の推定はある意味では簡単である。原子炉が保有していた放射性物質の大部分が放出されたと考えればよいからである。経済協力開発機構 (OECD) の報告では, ¹³¹Iの50%が放出されたとし, その総放出量は1760 PBqとされている (PBqはGBqの100万倍)。

水素爆発による 詳細な経過の完全解明

— 今回の事故の最大原因 —

今回の事故の特長は, 1号機, 2号機, 3号機いずれでも水素爆発が起こっており, 爆発の約8時間後には, 放射線

量の顕著な増加がみられることである(図4)。爆発の結果、1号機と3号機では建屋の天井が完全に吹き飛んでいる。この写真を爆発の専門家数人に見せて爆発のエネルギーを推定してもらったところ、TNT爆薬約100 kg相当というのが共通した見解であった。室内でのこの大爆発が室内の機器に与えた損傷は甚大なものであったと推定される。一次災害によって引き起こされた二次災害が事故からの回復を決定的に遅らせることになったと思われる。

今回の事故は予想外の高さの津波による必然的事故のように言われるが真実ではない。津波は、原子炉建屋に達したがいずれの建屋も無窓なので海水の侵入はない。防災の常識として決定的に重要な機器は室内に入れてあるので直接の被害はなかったはずである。特に地震による原子炉の緊急停止とそれに伴う原子炉発電停止に対しては外部電源への切替えが行われ、それも断たれたときは10秒後には自家発電用のディーゼルエンジン(新潟鉄工製)が始動する仕組みになっていた。ディーゼルエンジンは屋内にあるからすぐ始動したはずである。はじめ始動したという証言もあるが、その後は動いてない。その結果、炉心冷却水の供給が止まり、水素爆発につながる事態が生じたのである。もし自家発電用のディーゼルエンジンが始動して、運転を続け、炉心に冷却水を送り続けていたら今回の地震と津波はあってもここまでの大事故にならなかったはずである。

これが今回の事故の原因として解明すべき第1に重要な

点である。第2に重要な点は、炉心冷却が止まって水素爆発に至るまで25時間あったのになぜ何の対策も打てなかったのかという点である。以下これについて理論計算を主軸に解明する。

TNT爆薬100 kg相当の水素爆発を起こす水素量を計算すると、40 Nm³になる。これだけの水素の発生源について3月現在、関係者はまったくわかっていない。ただ発生源は炉心ではなく燃料プールであろうと主張するだけである。

水素発生は、燃料棒を被覆しているジルコニウム合金が高温で水蒸気と反応するとき起こる。この反応には700~800℃以上の高温が必要である。12日の時点では、燃料プールにある燃料は残存崩壊熱量も小さく十分な水も残っているのでこんな高温にはならない。炉心でこの反応が起こったと考えられる。

この解明のためには、地震直後の炉心での温度、圧力のデータが欲しいが、地震当日の11日のデータはまったくなく、爆発当日の12日についても使えるのは水位データだけである。炉圧データはあるが、0.800 MPaGの一定値で計器不良と思われる。

そこでつぎのような方策を考えた。利用可能な炉の水位データを完全に再現できる理論物理結果が得られれば、理論が想定した炉内状況は正しいであろう。ここで理論物理計算といいシミュレーションと言わないのは、理論物理計算とは、すべての式と係数を公開し、誰でもがチェックで

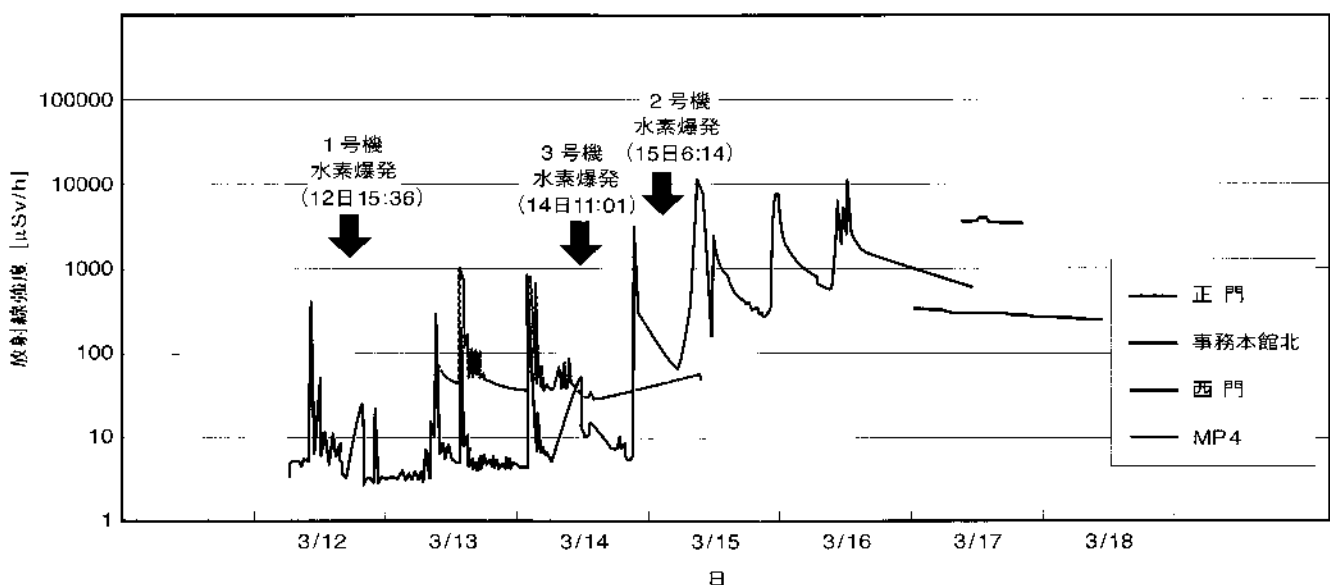


図4 福島第一原子力発電所周辺の放射線強度変化(東京電力プレスリリース、環境エネルギー政策研究所(ISEP)資料を参考に作成)

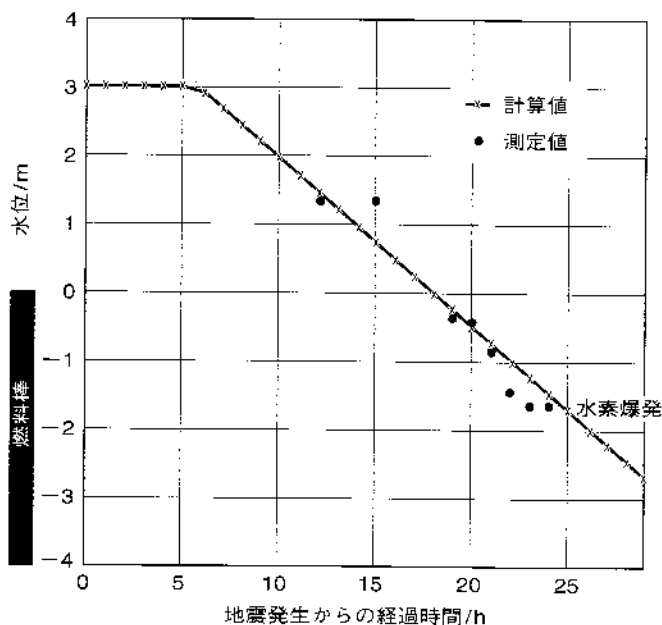


図5 福島第一原子力発電所1号機の水位の変化の理論値と測定値（測定値は原子力災害対策本部の発表資料より）

きる計算であるのに対し、シミュレーションは他人が完全なチェックを行うことは不可能なので、裏で適当な操作をして結果を合わせることができると、現在のような目的には不向きだからである。

炉内水位の変化の理論計算

炉内水の温度上昇と沸騰後の液位の変化を次式で計算した。

沸騰前の温度 T の変化

$$\rho C S_c h_0 \frac{dT}{dt} = Q$$

表3 燃料棒の輻射熱の計算

変数の説明	使用済燃料	炉内燃料	単位	式
燃料棒の発熱量(Q)	4000	6000	kcal/h	
単位面積発熱量(J)	46309.667	69464.501	W/m ²	$QW \cdot 1000/S$
ボルツマン定数(σ)	5.67E-08	5.67E-08	W/(m ² K ⁴)	
燃料棒の径(d)	0.008	0.008	m	
燃料棒の長さ(L)	4	4	m	
燃料棒の表面積(S)	0.100531	0.100531	m ²	$\pi d \cdot L$
燃料棒体積当り比熱		3.0	J/LK	

表2 1号機の熱収支

炉の半径	2.4 m
炉の高さ	20 m
初期水位	7.5 m
燃料棒長さ	4 m
初期水温	40 °C
下端から燃料棒下端まで	0.5 m
燃料棒	400 本
燃料1本の残存発熱量	6000 kcal/h
残存発熱量	2400000 kcal/h
圧力	0.353 MPa
水容量	135.7168026 m ³
沸点温度	139 °C
水温上昇率	17.68 °C/h
沸騰するまでの時間	5.60 h

沸騰後の水位 h の変化

$$\Delta H \rho S_c \frac{dh}{dt} = Q$$

Q は炉内燃料棒全体の残存発熱量、 S_c は炉の断面積、 h_0 は初期水位、 ρ 、 C は水の密度と比熱、 ΔH は水の蒸発熱である。

地震以後、水素爆発までの25時間について、1号炉の水位の変化の理論物理計算結果と測定データの比較を図5に示す。

誰でもこの計算をチェックできるように計算に使った数値はまとめて表2に示してある。ほかはすべて公表されてい

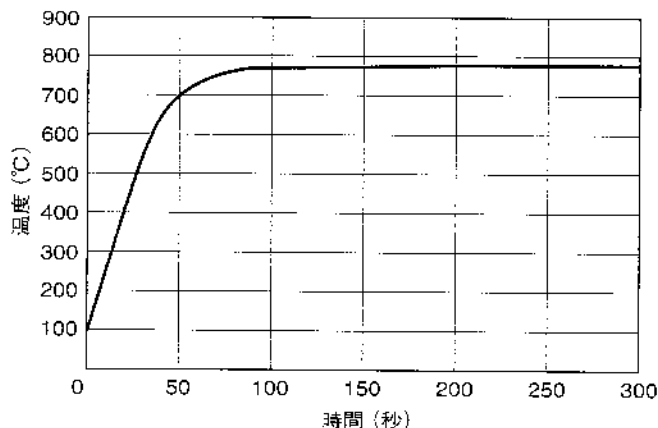


図6 燃料棒が露出した状態での温度変化（計算値）

る数値であるが、炉内燃料棒の残存発熱量は公表されていないので、6000 kcal/hとした。これはつぎのような理由による。3月18日午後の東京電力の記者会見で、各燃料プールについて総発熱量と使用済み直後燃料の本数の発表があり、最小二乗法により使用直後燃料1本の残存発熱量は4000 kcal/hとわかった。それを50%割増して炉内燃料1本の残存発熱量とした。

理論物理計算の基本仮定は「水の蒸発によって水位が下がる」である。この計算が、観測された水位変化と完全に一致したことはつぎのことを意味する。

- 1) 水位の低下原因は、蒸発と蒸気漏えいであって、水の漏えいではない。
- 2) 蒸気の漏えいが起こったのは、初期液面から上の炉頂部につながる配管、つまりタービンに行く配管、タービンから出る配管と思われる。

タービン系配管の破損なら、炉内圧力はほとんどゼロになるはずである。炉内圧力計には2系統あり、(A)系統ははじめ24時間0.800を示したまま作動しておらず、爆発8時間前に0.35を示しただけで不調になり爆発7時間以後は正常に復帰し0.05 MPaGを示した。計算は一応0.35 MPaで行ったが、0.05 MPaにしても沸騰するまでの時間はわずかに変わるだけで計算結果は変わらない。実際は地震でタービン配管が破損したあとは0.05 MPaGであったと推定する。

燃料棒の温度上昇と水素発生

計算結果によれば、17時間後水位は0 mを割り、燃料棒の上部が露出し始めている。露出した部分については、発熱量は変わらないのに水の蒸発による除熱がないから、燃料棒の温度は輻射放熱と釣り合う温度まで上がる。この温度 T の上昇は次式で計算される。

$$\rho C v \frac{dT}{dt} = q - s \sigma T^4$$

∴ s 、 q は燃料棒単位長さ当たりの体積、表面積、発熱量。 σ はシュテファンボルツマン定数である。 v 、 s 、 q を計算するのに使った基礎データを表3に示す。温度上昇の計算結果を図6に示す。1分で平衡温度の90%に達する。そして平衡温度は779℃である。

ジルコニウム合金と水蒸気との接触による水素発生速度の実験結果は図7に示す通りで、700℃以下ではほとんど起こらず、800℃以上のことはわかっていない。779℃は最高の水素発生速度が確かめられた温度に近い。燃料プールにある使用済み燃料の場合は、発熱量が4000 kcal/hなの

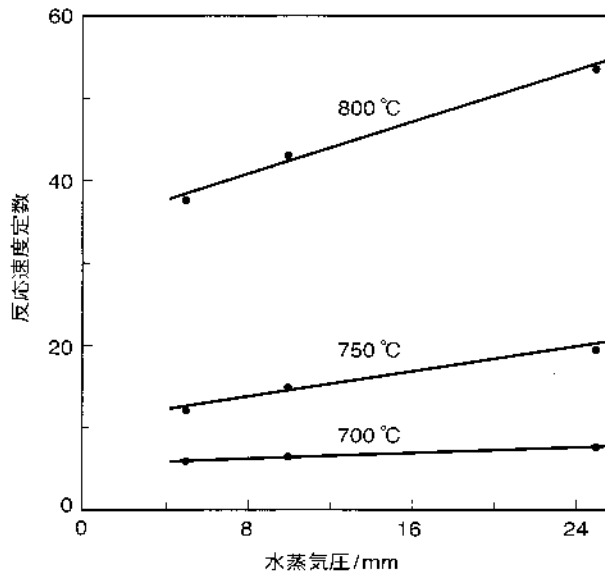


図7 水蒸気中でのジルコイ-2の酸化反応 (R. E. Westerman, *J. Electrochem. Soc.*, 111, 143 (1964))

で温度は677℃となり、図7からみると、水素発生はほとんどない。

研究結果から導かれる重要な結論

- 1) 放射性物質の大気と海域への排出を比較すると、大気への放出は、1000倍程度大きい。
- 2) 仮に3月22日の状態で大気への放出が100日間続いたとすると、総放出量はチェルノブイリ事故の1/1000を越えない程度である。
- 3) 液位低下の理論物理計算が実測値と完全に合っていることから、地震で炉本体の破損はなかったが、タービン付近の蒸気配管系が地震によって破損したと推定される。
- 4) 同じく液位の理論物理計算と実測値の比較から地震時沸騰状態にあったはずの水温が一見40℃まで下がり、6時間後に沸騰していることから、地震直後にはディーゼルエンジンによる緊急発電系が働き、いったん水温を下げたが、その後エンジンが止まり、冷却機能がなくなり、水素爆発に至ったと推定される。

参考文献

1. このモデルの説明は、環境科学辞典(東京化学同人刊)を参照。
2. 西村 肇, “瀬戸内海沿岸における廃水の分散について”, 日本の科学者, 別冊No.4, p.22 (1972).