解	説
---	---

スリーマイルアイランド原子力発電所の事故 と放射線モニタリングの概要

吉田 芳和^{*1}

(1979年 11 月 19 日受理)

Accident at Three Mile Island Nuclear Power Plant and Related Radiological Monitoring

Yoshikazu YOSHIDA^{*1}

KEY WORDS: TMI Nuclear Power Plant, accident, environmental monitoring, environmental dose, emergency response, emergency monitoring, radiation protection.

米国スリーマイルアイランド原子力発電所 (TMI) 2 号炉が本年 3 月 28 日に事故を起こしてからほぼ半年が経過した。わが国においては、この事故を契機として原子力施設における安全管理体制の再点検など安全対策の強化に必要な措置が講じられてきた。また、原子力安全委員会に設置された米国原子力発電所事故調査特別委員会においては、米国の情報をもとに事故の経過などについて調査を行なうとともに、事故から得られた教訓を安全性の一層の向上に反映させる観点からも検討が行なわれてきた。

ここでは、主として 9 月 13 日に公表された上記委員会の第 2 次報告書¹⁾に基づいて TMI-2 号炉の事故の概要と事故後の放射線モニタリング、とくに主として環境モニタリングとその結果の評価について述べる。

1. TMI-2 号炉の概要と特徴

1.1 TMI-2 号炉の概要

TMI-2 号炉は 1 号炉とともに米国ペンシルベニア州にあり、ワシントンの西北西 100 マイル、ペンシルベニア州都 Harrisburg の東南約 10 マイルの地点のサスケ

ハナ川の大きな中洲に設置されている (第 1 図²⁾参照)。

TMI-2 号炉は、1 号炉と同じくバブコック・アンド・ウィルコックス社 (B & W 社) の設計によるもので、電気出力 959 MW、熱出力 2,772 MW である。同炉は、今回の事故のちょうど 1 年前、1978 年 3 月 28 日初臨界に到達し、1978 年 12 月 30 日から営業運転に入った。

1.2 TMI-2 号炉の主な特徴¹⁾

B & W 社製の原子炉 (PWR) は、ウェスチングハウス社設計の PWR とくらべて設計のねらいや系統機器等の構成にかなりの相異が認められる。TMI-2 号炉の事故に関連する点で、日本の PWR と異なる主な特徴は次のとおりである。

① 蒸気発生器で過熱蒸気を発生しタービンに供給する設計となっているため、蒸気発生器はワンスルー型を採用し、蒸気発生器の 2 次側の水量が少ない。したがって、主給水ポンプが停止したときに補助給水ポンプの起動に許される時間的余裕が少ない (わが国の PWR の蒸気発生器の 2 次側の水量は TMI の約 4 倍あり、補助給水ポンプが 15 分間起動しなくても加圧器逃し弁は開かない)。

② 2 次側のトラブルで 1 次側の原子炉を緊急停止しない設計となっている。すなわち、タービン停止などのときは積極的に加圧器逃し弁を開く設計である (わが国

^{*1} 日本原子力研究所保健物理部; 茨城県那珂郡東海村 (〒319-11)

Division of Health Physics, Japan Atomic Energy Research Institute; Tokai-mura, Nakagun, Ibaraki-ken.

第1図 スリーマイルアイランド付近の地図 (TMI UNIT 2 FSAR より)²⁾

の PWR はタービン停止で原子炉が緊急停止される)。

③ 加圧器逃し弁の制御室における開閉表示は逃し弁の実作動を示すものではなく、逃し弁開閉の要求信号を示すものであった。しかも、この開閉表示は建設後の補修時に設置されたもので、このことは運転員に徹底されていなかった。

④ 補助給水ポンプの出口弁は、ポンプ起動信号により自動開にはならない。

⑤ 格納容器隔離は格納容器圧力高信号によってのみ行なわれる。

2. TMI-2 号炉の事故の概要

2.1 原子炉事故経過の概要

第2図は TMI-2 号炉の事故経過の概要を示す概念図で、初期に発表された事故概要説明図³⁾に気体状放射性物質の主な放出経路(後述)を追加したものである。

TMI-2 号炉の事故経過の主要な点を要約すると次のとおりである⁴⁾。

(1) 事故発生前、プラントは、定格の 97% の出力で運転中であった。機器の運転状況中、事故に直接関連する重要なものとして次の点が指摘されている。

○の中の番号は、事故シーケンスを示し、()の中の時間は事故発生後の時間を示す。

① 2次給水系のトラブルにより主給水ポンプが停止(0秒)。②タービンが停止(0秒)。③原子炉の圧力上昇により加圧器の圧力逃し弁が開く(3～6秒)。④原子炉の圧力上昇により原子炉が停止(8秒)。⑤補助給水ポンプ3台共自動起動したが出口弁が開いていなかった〔蒸気発生器での熱除去ができなくなった〕。⑥非常用炉心冷却系(ECCS)の高圧注入系が自動的に作動(2分)その後流量をしばって運転。⑦原子炉格納容器サンプに水がたまつたため移送ポンプが自動的に作動し、廃液貯蔵タンクへ移送(38分まで)。⑧出口弁を開き補助給水ポンプによる給水を開始(8分)。⑨加圧器逃しタンクの圧力逃し装置が作動し、蒸気と熱水が原子炉格納容器の中に放出(15分)。⑩一次冷却材ポンプ2系統共停止(1時間14分～1時間41分)。⑪抽出・充填系に多量の放射性物質を含む一次冷却材が流入、この中の放射性物質が、補助建屋内に放出され、さらに大気へ放出。⑫圧力逃し弁元弁を閉止(2時間18分)。その後、原子炉圧力を低下させて余熱除去系を作動させようとして間欠的に開く(3時間～13時間30分)。⑬格納容器の隔離弁が自動的に閉じる。⑭原子炉圧力が低下したため蓄圧タンクが自動的に作動し、炉心に注水。⑮格納容器内の圧力上昇により格納容器スプレーが自動的に作動(9時間50分)、6分後停止。⑯圧力逃し弁元弁を閉じ、原子炉圧力の上昇を図る(13時間30分)。⑰一次冷却材ポンプ1台再起動、蒸気発生器1台により原子炉の冷却を実施(16時間)。

第2図 事故概要説明図(原子力安全委員会月報の説明図³⁾に原研・村主進氏が加筆したもの)

① 加圧器逃し弁または安全弁より約 6 gpm (約 1.4 m³/hr) の漏洩があり、この状態のまま長期間運転を継続していたこと。

② 補助給水ポンプの出口弁が技術仕様書(保安規定)に違反して2個とも閉になっていたこと。

③ 復水脱塩系の樹脂移送ラインがつまり、事故前約

11時間にわたって樹脂を移送すべく作業が行なわれていたこと。

(2) 事故の発端は3月28日午前4時に、復水脱塩器の樹脂移送用の水が空気系に入り、復水脱塩系の弁が閉り、この結果給水ポンプが停止して主給水が喪失したことである。

(3) 給水ポンプの停止後直ちに補助給水ポンプが起動したが、出口弁が閉っていたため、運転員がこの出口弁閉に気づいて弁を開くまでの8分間、給水が完全に喪失した。

(4) 給水ポンプ停止に伴い、タービンが停止し、1次系の圧力が上昇して加圧器逃し弁が開き、さらに圧力高信号で原子炉は緊急停止した。これにより、1次系の圧力は低下し、加圧器逃し弁が閉じる圧力に達したが、弁が開いたまま固着した。このため、1次冷却材の流出が続き、1次系圧力はさらに低下し、加圧器水位は急上昇した。逃し弁閉固着は当初運転員によって認識されず、約2時間20分後に逃し弁が閉じられるまで、1次冷却材の流出が続いた。

(5) 1次系圧力の低下により、高圧注入系 (ECCS) が作動したが、運転員は加圧器水位計を見て系が満水であると信じ、ポンプを停止したり流量を絞ったりして、長時間にわたり原子炉内に十分な注水を行わなかった。

(6) 加圧器逃し弁から1次冷却材の流出が続く一方、高圧注入系からの注水流量がしぼられたので1次冷却材が不足し、1次系に蒸気泡が生じ、冷却材ポンプが振動を起して揺れが激しくなり、運転員はポンプを停止した。このため、事故は決定的に悪化した (約1時間40分後)。すなわち、それまで炉心は気液混合流で覆われていたが、気泡が上方に抜けて炉心上部が露出し、温度が上昇して燃料の大規模な損傷が生じた。これにより、大量の放射性物質が1次冷却材中に放出され、また金属-水反応による水素が発生した。この結果、放射性の希ガスおよびヨウ素が補助建屋内にある抽出・充填系を通じて建屋外に放出された。炉心の冷却は、事故発生後16時間で冷却材ポンプを再起動するまで、不十分な状態であったと考えられる。

以上のことからわかるように、事故を起し、悪化させた主な原因は、B&W 社炉は負荷追従型の高性能化されたプラントであるが、給水喪失事故時における対応策が設計ならびに運転員の教育訓練の面で十分でなかったこと、および補助給水ポンプの出口弁閉での運転のような明かな技術仕様書違反など運転、保守管理に問題があったことによると考えられる。

2.2 放射性物質の環境への放出経路と放出量

(1) 炉心の損傷程度

前述のように、事故発生後1時間40分頃に炉心の露出が発生し、16時間までの間に計3回の露出があり、炉心の損傷は30% (燃料被覆管は約90%が破損⁴⁾) に及ぶと推定されている。また、1次冷却材中放射能濃度の測定結果では、放射性のヨウ素およびセシウムの冷却材中への漏洩量は炉心内保有量の約10%であり、Xe-133のそれは格納容器内空気のサンプリング結果などから30%程度と推定されている。

(2) 気体状放射性物質の放出経路と放出量

冷却材中に漏洩した放射性の希ガスおよびヨウ素は1次冷却材の抽出、充填系のタンクやポンプなどの廃ガス減衰タンクを経由して補助建屋内に放出され、主として排気筒から環境へ放出されたと推定されている^{2,4)}。

事故発生直後に加圧器逃し弁から放出された1次冷却材が、原子炉建屋サンプから補助サンプタンクへ移送されたので、当初は、この補助建屋の床にあふれた水が、環境に放出された放射性物質の主な放出源となったと考えられていた。しかしながら、その後のNRCの調査²⁾では、3月28日～29日における原子炉建屋サンプからの水の移送状況、および補助建屋内の放射線量率測定結果、とくに抽出充填系付近や床にたまった水の表面の線量率調査結果から、この水からの放射性物質の放出はほとんどなく、主要な放出源は上記の抽出充填系であるとしている²⁾。

環境へ放出された気体放射性物質の主要なものは、希ガスとヨウ素で、3月28日～4月27日における放出量は次のように推定されている⁴⁾。

放射性希ガス 2.4×10^6 *2 ~ 1.3×10^7 Ci

I-131 13 ~ 17 Ci

また、4月1日現在放射性ヨウ素の建屋内分布は次のとおりと評価されている⁴⁾。すなわち1次系内に 7.5×10^6 Ci、格納容器の水中に 1.06×10^7 Ci、格納容器の空気中に 3.6×10^4 Ci、補助建屋のタンク中に 4×10^6 Ci が保持されていた。

事故発生後、放射性物質の大量放出とともに補助建屋の放射線量率の上昇などにより排気ガスモニタはオーバースケールとなったため、放射性希ガス放出量は熱ルミネッセンス線量計 (TLD) による環境線量の測定値と実際の気象条件とから推定されている。

その施設運転者による算出値は第1表^{1,2)} に示されるように 1.0×10^7 Ci で、NRCによる算出値 1.3×10^7 Ci

*2 排気ガスモニタ付近のγモニタの記録から推定された⁴⁾もので、より確からしい値と思われる。

第1表 放射性希ガス各核種の放出量推定値（3月28日7時～4月30日24時，単位 Ci）^{1,2)}

核種	半減期	γ 線実効 エネルギー (MeV/ dis)	3月28日7 時～3月29 日16時	3月29日17 時～3月31 日16時	3月31日17 時～4月3 日15時	4月3日16 時～4月6 日13時	4月6日14 時～4月30 日24時	計
Xe-133	5.29日	0.045	4.9×10^6	2.1×10^6	1.1×10^6	2.7×10^5	1.5×10^4	$8.3 \times 10^{*6}$
Xe-133m	2.25日	0.042	1.2×10^5	3.9×10^4	1.5×10^4	1.9×10^3	0	1.7×10^5
Xe-135	9.08時間	0.25	1.5×10^6	7.7×10^4	1.4×10^3	0	0	1.5×10^6
Xe-135m	15.65分	0.432	1.4×10^5	1.3×10^3	0	0	0	1.4×10^5
Kr-88	2.80時間	1.95	6.1×10^4	0	0	0	0	6.1×10^4
計			6.6×10^6	2.2×10^6	1.1×10^6	2.7×10^5	1.5×10^4	1.0×10^7

* 炉内蓄積量の約5%

（3月28日～4月7日）とほぼ一致している。

なお，放出放射性希ガスの全量 1.0×10^7 Ci を γ 線実効エネルギー $E_\gamma = 0.5$ MeV^{*3} に換算すると 1.9×10^6 Ci となる。また，Xe-133 の放出量は炉内蓄積量の約5%である。

I-131 の3月28日～4月30日間の放出量についても，施設運転者は排気中濃度の測定値（活性炭カートリッジによる連続捕集測定）から14 Ci と算出しており^{1,2)}，上記の値と一致する。

なお，希ガスの大量放出は3月28日7時頃に始まったが，ヨウ素はさらに2～3時間後に大量放出が始まったことが，モニタの記録などからわかる。

(3) 液体放射性物質の放出量

液体廃棄物は通常は放射性廃液の処理をしない産業廃液処理系（Industrial Waste Treatment System）からサスケハナ川へ放出された。その排出量は，排水モニタの指示値および排水サンプルの分析結果から，3月28日～3月30日の間で72.56 mCi（I-131）と算出されている。

この放射性廃液の大部分は，蒸気発生器からの2次冷却材サンプル採取時にフラッシングした水が建屋内サンブから産業廃液処理系に移送されたものである。

3. 環境のモニタリングと住民の健康への影響評価

3.1 モニタリング活動

事故発生後 TMI 原子炉施設運転者から州政府への緊急事態の通報（7時），NRC 第1地域事務所への事故の

通報（7時45分）が行われ，州，連邦政府機関（第3表参照）の職員が省庁間放射線援助計画（Interagency Radiological Assistance Plan；IRAP）にもとづいて環境モニタリングを分担実施した。

各機関職員の環境モニタリング活動の状況は次のとおりである^{1,2)}。NRC 職員は，3月28日10時に第1次チーム5人（検査官と保健物理担当者-放射線測定器携行）の現地到着にひきつづき，3月29日15時30分に29人が到着し，3月30日夕方には83名，多いときには100名以上が現地に集り，環境モニタリングを含む事故処理活動に参加した。

NRC 始め，政府機関職員の環境モニタリング参加人員は約100人（州15人，DOE 40人，EPA 17人，HEW 10人，NRC 10人）であった。また，放射線防護の中心的役割を果たした DOE 機関職員の防護活動人員は，BNL からの放射線援助チームを含め4月始めには100人以上におよんだ。また環境モニタリング活動のため3月30日までに TMI サイトに集められた装置の主なものを第2表¹⁾に示す。

連邦政府各機関によって実施された環境モニタリングの項目と試料採取，測定数の概要を第3表¹⁾に示す。

第2表 環境モニタリングのため TMI サイトに集められた主な装置類（3月30日現在）¹⁾

NRC の測定車（電話2回線付）	1台
NRC の事務所用移動車	1 "
事務所用トレーラー（設置者提供）	1 "
携帯用無線機（林野庁，US Forest Service）	200 "
携帯用放射線測定器	多数
ヘリコプター（測定および活動援助用，DOE）	3台
分析測定車	2 "

*3 γ 線実効エネルギー E_γ は1崩壊当たりの γ 線エネルギーの総和である。放射性希ガス雲からの照射線量が，放射能濃度と γ 線エネルギー E の積にほぼ比例することから $E = 0.5$ MeV に対する照射線量に，希ガス混合核種の γ 線実効エネルギー E_γ と 0.5 MeV との比をかけることにより，希ガス雲からの照射線量を簡便に計算する方法が用いられる。

第3表 環境測定項目の概要¹⁾

測 定 対 象		測定試料数, 頻度
線 量 測 定	TLD (熱ルミネッセンス線量計)	850 (全測定数)
	走行サーベイ	数回/日
	定点における線量率連続測定	31地点以上
	航空測定 (放射性雲)	2 ~ 9 回/日
環 境 試 料	ミルク	~315 サンプル
	空気 (ヨウ素とダスト)	~520 "
	水	~160 "
	植物 (野菜, 牧草)	~260 "
	土壌	~220 "

測定試料数は4月23日現在
測定実施機関: ①, NRC (原子力規制委員会); ②, DOE (エネルギー省); ③, EPA (環境保護庁); ④, FDA (保健教育福祉省の食品薬品局); ⑤, ペンシルバニア州; ⑥, 原子炉施設運転者

(1) DOE の活動¹⁾

3月28日8時45分に DOE 緊急管理センター (Emergency Operation Center) はペンシルバニア州および NRC から TMI サイトにおける放射線防護活動の支援を正式に要請され, 可能な限りの支援をすることを決定し, 14時前後には BNL の放射線援助チーム (Radiological Assistance Team, RAT) および航空測定システム (Aerial Measurement System, AMS) のヘリコプタ (H-500) が, 現地に到着し, 活動を開始した。RAT は葉菜, 土壌, 空気のサンプリングおよびサイト周辺の放射線量の測定を行い, これらモニタリングの結果を公衆への影響評価の資料として直ちにペンシルバニア州および NRC に提供した。

このように IRAP に基づいて緊急時の環境モニタリングの中心的役割を果たした DOE の分担および用いられる主要機器の概要は次のとおりである。

a) BNL : Region I, すなわち北東部 11 州で発生する放射線事故に対し, 実際の事故時モニタリングとその処理, または技術的援助の責任を有しており, 現地に出動し環境モニタリングを実施する。

なお, BNL では 24 時間の緊急時に対する当番責任者が定められているほか, 次の可搬型キットおよびトレーラーが常時準備されている。

① 可搬キット	台数
a. 計器類キット	3
b. データ参考キット	2
c. 防護服キット	4
d. サンプル収集キット	4

② 緊急トラック

1

b) 航空放射線測定システム (AMS) : EG&G 社による飛行サーベイスシステムで, 飛行機 3 機とヘリコプター 4 機 (Hughes H-500, Boeing Bo-105 各 2 機) を有し, 放射線測定器を装備している。

放射線量率サーベイ用には 12.7cmφ×5.1cm の NaI 検出器を 20 個装備した測定器セット 2 台 1 組を用いている。機上では出力が, 磁気テープに記録され, 地上で計算機により解析される。ほかに, 可搬型放射線量率測定器, 波高分析器, ヨウ素, ガスサンプラを装備できる。

各原子力サイトにおいては, プラントの稼動前に航空写真をとるとともに, 飛行 (通常高度 500 ft) によるバックグランド放射線量率の測定が行われ, 等線量線図が作成されており, 事故時の測定との比較に用いられる。

c) 大気放出助言能力 (Atmospheric Release Advisory Capability, ARAC) : ローレンスリバモア・ラボラトリーが担当しており, ①空軍による地球全体の気象データと②各サイトにおける局地的気象データとから計算機による気象予測と風下の濃度分布の予測を行なう。

d) その他の機関: DOE Environmental Laboratory による環境試料の分析のほか, ORNL, SRL など他の研究機関が応援活動を行なう。

(2) EPA の活動¹⁾

EPA は支援的な立場から, 州と密接に関連付けながら, とくに空気と水のサンプリングおよび空間線量率の測定に重点を置いたモニタリングを実施した。EPA の空気サンプラ (31カ所) およびガンマ線量率記録計 (34カ所) の配置は次のように行なわれた。

① 原子炉から半径 3 マイルの円周上に30度間隔で12カ所

② 半径 6 ～ 7 マイルの円周上に、できるだけ内側の円周上のステーションの間になるような間隔で11カ所

③ 7 マイル以上離れた人口の集中した場所に 8 カ所
これら31カ所のステーションは、粒子物質捕集用のガラス繊維フィルタおよび放射性ヨウ素捕集用の活性炭カートリッジを備えた、流量 400 m³/日 (約 10 cfm) の空気サンブラで構成される。

また、ガンマ線量率記録計は上記31カ所の空気サンブラ配置個所のほか、3カ所計34カ所に3月31日に配置された。

3.2 周辺公衆の外部被曝線量

3.2.1 外部放射線量

外部放射線量については、第3表に示したようにTLD、地上走行サーベイ、臨時に設置された照射線量率測定用モニタなどによる測定のほか、放射性雲中線量率の測定値からの推定も行われている。後述のように周辺公衆の外部被曝線量は、TLD 測定値から評価されている。

(1) 放射線量率

地上における照射線量率の測定結果では、TMI-2 号炉の中心から約 700 m の敷地境界 (北門付近) で、最大 70 mR/hr、また敷地外でも 10 mR/hr 以上が検出されている。第3図¹⁾は、TMI-2 号炉から1マイル地点の高度 500 フィートにおける照射線量率の最大値の推移

を示す。

(2) TLD による照射線量の測定

原子炉施設運転者により平常時の環境モニタリングのため、TLD が4半期ごとの積算線量測定用として、TMI サイト内および周辺約 15 マイル以内 20 カ所に配置されていた (3 箇所の TLD は 6 カ月間)。これらの TLD が、3月29日に回収測定され、その後引き続き同位置に配置され測定が行われた。事故発生後回収までの線量は、TLD の測定値から、原則として1978年の第1四半期のバックグラウンドを差し引くことにより、求められた。

また、NRC は、TLD を3月31日にサイト周辺37カ所に、4月5日には付近の学校敷地10カ所を追加し、計47カ所 (0.5～13.8 マイル) に配置し測定を行った。この場合、1 箇所に1日ごとの線量読取り用と長期間の線量読取り用の2セットの TLD が配置された。ほかに、FDA と州も TLD による測定を実施した。

3.2.2 外部被曝線量の評価

TLD による測定結果から周辺公衆の被曝線量を評価した結果⁵⁾は次のとおりである。

① 周辺公衆の個人最大被曝線量

TMI 敷地に最も近い居住区域に居た個人の最大被曝線量は 100 ミリレム以下である。この値は、TMI の東北東 0.5 マイルにおける TLD の測定値の積算値 83 ミリレムにもとづき、公衆の個人が3月28日～4月7日の全期間屋外に居たと仮定し、測定精度を考慮して得られた値である。

第3図 航空サーベイによる最大線量率の推移¹⁾

TMI 原子炉から1マイル (1.6 km) 地点 (高度 500 フィート (150 m))

② 集団線量評価値

TMI を中心に 16 方位別に半径 50 マイル以内を半径、0.379, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50 マイルごとに同心円状に分割した区域の人口(人)と、TLD の測定値から求められた各分割区域ごとの平均線量(ミリレム)との積を積算することによって半径50マイル以内の住民約 216 万人の集団線量(人・レム)が下記の条件を用いて評価された。この場合各分割区域内の線量は、半径方向、距離についての各測定値の内挿により、また測定値のない外側の区域については、線量が距離の 1.5 乗に逆比例するとして外挿し、また測定値のない分割区域の値は隣接区域の測定値の内挿により求められた。

その結果、半径50マイル以内の住民の集団線量は3,300 人・レムと評価された。この値は、被曝線量の寄与の最も大きい3月28日～3月31日の期間については施設運転者が事故前から配置していた20カ所の測定値しかないとを考慮して、評価に用いる TLD 測定値の条件を4通り選択することによって得られた4つの値、1,600, 2,800, 3,300, 5,300 人・レムの平均値である。

ここで、1,600 人・レムは施設運転者が8マイル以内に配置した TLD の測定値のみ、2,800 人・レムは最初の3日間については施設運転者が、また残り期間については NRC が8マイル以内に配置した TLD の測定値を用いた値であり、3,300 人・レムは施設運転者の配置したものすべてによって、5,300 人・レムは、最初の3日間については施設運転者の、また残りの期間については NRC の配置したものをそれぞれ用いて評価したものである。

なお、気象データから得られる相対濃度 χ/Q を用いた計算では2,600 人・レム、DOE の航空測定における放射性雲中の照射線量率から得られた値は2,000 人・レムで何れも上記の評価値の範囲内にある。

なお、最終的な評価⁴⁾では、周辺公衆の個人最大は70 ミリレム、上記の集団線量は2,000 人・レムである。

3.3 環境試料の測定結果

第3表に示されるように、ミルクのほか、空気、植物(葉菜、牧草)、表面水、土壌について測定が行なわれた。ミルク中 I-131 の濃度の測定結果の例を第4表^{1,5)}に示す。この表中で、I-131 濃度の最大値 41 pCi/l (1 日 1l を飲む乳児の甲状腺線量5ミリレムに相当)は山羊のミルクで、牛乳では 36 pCi/l であった。これらの値は、牛乳の放射線防護対策レベル⁶⁾、すなわち、乳児に対し1.5 レムに対応する牛乳中濃度 12,000 pCi/l に対して十分小さく特に対策はとられなかった。空気試料については、対岸の Observation Center (0.4マイル)において3月29日～3月31日に ¹³¹I の濃度 $2 \times 10^{-11} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ が検出されたが、ほかの環境資料については、大部分が検出感度以下、または、それを少し上回る程度と報告されている。

これら環境試料の測定結果から期間中の I-131 による被曝線量の最大値はミルクを1日に 1l 飲む乳児に対し6.9 ミリレム、また吸入による小児(1歳)の線量は6.5ミリレムと算出された⁴⁾。

3.4 周辺住民の体内汚染検査¹⁾

周辺住民の内部汚染検査を実施するため、1台の全身カウンターがミドルタウンに設置され、4月10日より4月18日までに3マイル以内に居住する住民のうち希望者721人(最終的には760人)の全身計測による体内汚染の検査を完了した。その結果バック・グラウンドレベルを越える値は検出されなかった。

3.5 周辺住民の健康に与える影響の評価

NRC, HEW および EPA の代表で構成される集団線量評価グループが、環境モニタリング結果に基づいて周辺住民の健康に与える潜在的影響の評価を行なった⁵⁾。

全身低線量被曝の身体的影響および遺伝的効果の評価のため、BEIR 報告書に基づいて、致死がん、非致死がんおよび遺伝的効果のリスク係数(単位集団線量当たりの発生数/人・レム)が誘導された。これらのリスク係

第4表 ミルク中の放射性ヨウ素濃度測定結果^{1,5)}

牛乳サンプル (3月24日～4月4日)	ペンシルバニア	FDA	EPA	Met. Ed.
分 析 数	133	106	4	21
プ ラ ス の 結 果 数	7	41	2	18
プ ラ ス の 結 果 平 均 値 (pCi/l)	15	20	17	7
プ ラ ス の 結 果 範 囲 (pCi/l)	11～20	13～36	10～24	1～41

4月5日～4月29日の間に FDA により 622 サンプルの採取測定が行なわれたが、うち検出限界 (10 pCi/l) 以上のサンプルの数は7個 (最大 36 pCi/l) であった。

第5表 TMI 事故によって、50マイル以内の周辺住民が受ける予想される、潜在的な健康への影響^{1),5)}

効 果	通常の場合に発現する人の推定数	(うち自然放射線によるもの)	TMI 事故により、1979年3月28日から4月7日までに受けた集団線量の潜在的な終生の影響	
			範 囲 ^{a)}	中央推定値 ^{b)}
致 死 的 癌	325,000 ^{c)}	(1,700~9,000) ^{d)}	0.15~2.4 ^{e)}	0.7
非 致 死 的 癌	216,000 ^{f)}	(1,700~9,000) ^{d),g)}	0.15~2.4 ^{e),f)}	0.7
遺 伝 的 効 果				
第 1 世 代	78,000 ^{h)}	(60~970) ⁱ⁾	(0.01~0.64) ^{j)}	—
将来の全世代			0.05~4.8 ^{k)}	0.7
健康への全影響			0.4~10 ^{l)}	2.0 ^{l)}

a) 集団線量推定値の範囲と放射線被曝のリスク推定値の範囲の両者を考慮した両極端の範囲。

b) 中央推定値は、リスク係数の上限値と下限値の幾何平均(致死がん 2×10^{-4} /人・レム、平衡時の遺伝的効果 2×10^{-4} /人・レム)と集団線量の平均推定値(3,300人・レム)の積。

c) 癌による死のリスク(0.15、アメリカ癌学会の推定)にもとづく。

d) 自然放射線(125ミリレム)による年間発生率と平均寿命70年より求めた。

e) 集団線量の下限推定値(1,600人・レム)と発癌のリスクの下限値(90×10^{-6} /人・レム)および、集団線量の上限推定値(5,300人・レム)に発癌のリスクの上限値(460×10^{-6} /人・レム)を掛けて求めた。

f) 癌になるリスクの推定値(0.25、アメリカ癌学会による)と癌によって死亡するリスクの推定値(0.15)の差から求めた。

g) 癌による死亡率の2倍の癌発生率があるものと仮定。

h) 遺伝的効果の自然年間発生率(10^6 人あたり1年あたり1,200)と推定遺伝有意期間30年を掛けて求めた。

i) 第1世代に対するリスク($7 \sim 120/10^6$ 人・レム)に推定遺伝有意期間30年とから求めた。

j) 第1世代に対するリスクの下限値(7×10^{-6})およびリスクの上限値(120×10^{-6})と集団線量推定値の下限値および上限値とから求めた。

k) 平衡時におけるリスクの限界値から求めた。

l) これらの効果は等価でないが、潜在的な健康への全影響の推定値を与えるために便宜上計算した。

数の推定値と、前述の集団線量の評価値 3,300(1,600~5,300)人・レムとから、50マイル以内の住民 216 万人の健康に与える影響が評価された。

第5表^{1),5)}は事故による50マイル以内の周辺住民の終生における健康への影響の評価値を自然のがん発生率並びに遺伝的影響と比較したものである。この表から、周辺住民 216 万人のうち自然にがんて死亡する人が約 32 万人であるのに対して、この事故による放射線被曝(3,300人・レム、1人平均 1.5 ミリレム)のためにがんて死亡する人数の増加は 0.7(0.15~2.4)人であり、健康への影響は遺伝的効果も含めて無視できることがわかる。

皮膚および甲状腺被曝の影響についても評価されているが、その結果は全身被曝の影響よりも小さく無視できる。たとえば、放出放射性希ガス各核種の組成とその放出放射線の特性とから γ 線による全身被曝線量 100 ミリレムの場合の($\beta + \gamma$)線による皮膚被曝線量は 380 ミリレムと算出されているが、この値は、BEIR 報告書に報告されている皮膚がんの誘発線量 450,000 ミリレムの 1,000分の1以下である¹⁾。

4. プラントにおける放射線管理

4.1 モニタリング活動とその考察

事故発生後1時間の5時頃から格納容器内の放射線量率の上昇によりプロセスモニタなどがアラームを発生し始めた。原子炉建屋内では、インコア計測パネルエリアモニタの指示値が6時22分から14分間に 1 mR/hr から 10 mR/hr 以上まで急上昇した。補助建屋では、充填ポンプエリアモニタの指示値が6時36分に 0.7 mR/hr から上昇を開始し、7時には 1 R/hr になった。また、6時40分頃には補助建屋と燃料取扱建屋の排気系のモニタの大部分が放射性ガスによる急上昇を示した。

これらのアラームを発生したエリアモニタやプロセスモニタの指示値および補助建屋内のサーベイ結果にもとづいて補助建屋からの退避が決められ放送された。

6時45分には、発電所緊急事態が宣言され、緊急管理センタが1号炉制御建屋内保健物理管理室に設定された(一般緊急事態は7時24分に宣言された)。

補助建屋内においては線量率が 10~100 R/hr とくに 1 次冷却材抽出ポンプや充填ポンプ付近では 100 R/hr

以上に達した。また、空気汚染のレベルは、排気中 I-131 の濃度の測定値から $10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 以上であったと推定される。

このような状況下で緊急時の作業が行なわれた。すなわち、1 次系、2 次系のサンプルの採取・測定、各プロセスモニタの指示（警報発生状況）の確認、プラント内のサーベイ、空気汚染の測定などによって、放射性物質のプラント内漏洩状況、放射線レベルの把握に努めているが、これらプラント内における防護活動状況の具体的内容²⁾については省略し、気付いた主な問題点を列記する。

i) 高線量率の測定にはテレテクター（一般に 1,000 R/hr まで測定可能）^{*3} が用いられているが、高レベル測定器の測定範囲および台数が十分でなかったようである。

ii) 補助建屋内にサーベイなどのために入室した大部分の者が着用した直読式の個人線量計が数分で振り切れており（200ミリレム以上）、別に携帯している個人用の TLD を読み取るまで被曝線量を知り得なかった。また、指先など局部用被曝線量計が用意されていなかったようである。

iii) ヨウ素モニタが放射性ヨウ素と短半減期の希ガスとを識別できなかったために、I-131 の濃度が過大評価され、制御室における unnecessary 防護具を着用させることになり作業能率を悪くした。

iv) 放射性希ガス放出量が排気モニタの測定範囲を越えたため、放射性物質放出量の把握ができなかった。

v) 補助建屋への入室時に防護マスクやゴム手袋等の防護具が着用されているが、必ずしも十分でなく、高レベルの身体汚染が発生した。

以上のことは、個人アラームメータや高線量率測定器など緊急時用測定器類、緊急時用の防護具類の整備とその適切な使用に関する教育訓練が重要であることを示している。さらにわが国においても、高濃度の希ガス中ヨウ素の迅速測定器など緊急時用モニタの設置など事故時モニタリング方式の改善についても検討する必要があることを示している。

4.2 放射線作業従事者の被曝線量

TMI 従業員ら緊急作業に従事した作業者の外部被曝線量の人数別内訳と許容線量以上の主な被曝内容を第 6 表¹⁾に示す。また、作業者の集団線量は約 1000 人・レム

第 6 表 個人外部被曝線量（原子炉設置者）¹⁾（4 月 26 日現在）

全身被曝線量 線量範囲（ミリレム）	人 数
100～ 250	157
251～ 500	76
501～ 750	14
751～ 1000	9
1001～ 2000	2
2001～ 3000	0
3001～ 4000	2*
>4000～	1*

（被曝内容）

1. 補助建屋運転員 3170 ミリレム 3 月 28 日 21:00 コアフラッドタンクの窒素圧を上げる作業により被曝
2. 化学主任 4115 ミリレム 3 月 29 日 16:15 1 次冷却水サンプル採取作業により被曝（この作業による局部被曝（指）は 50～147 レム、皮膚線量は 6～13 レムである。また、同時に作業した放射線防護主任の局部被曝（前腕）は 44～54 レム、外部全身被曝線量は～800 ミリレムと推定されている）。
3. 原子力技師 3140 ミリレム 3 月 29 日 23:00 水もれの探査、廃棄物系の状態チェック作業により被曝

（6 月末まで）⁴⁾ であった。

第 6 表に注記されているように全身 3 レム以上の被曝者 3 名のうちの 1 名と他の 1 名が、局部（指または前腕）および皮膚の被曝線量が許容線量を越えたと推定されている。また、作業者の内部被曝に関しては、全身計測データについての NRC の調査からは許容量を越える被曝は認められていない。

なお、事故処理に参加した NRC 職員の全身被曝線量の最大は 4 月 30 日現在で 1 レム以下であった。

5. 退避などの措置

事故発生に伴ない米国連邦政府の「放射線防護援助計画」に参加している 10 の政府機関が、モニタリングなどそれぞれの定められた任務を遂行したが、初期には組織統制上の責任が不明確で関係機関の調整や連絡が十分でなかったため、情報の混乱が住民を不安におとし入れたと考えられる。

3 月 30 日午後、州知事は 5 マイル以内の妊婦と未就学児童の退避を勧告し、学校の閉鎖を行なった。これは、3 月 30 日午前中にヘリコプタによる測定で補助建屋上空で、1200 mR/hr が検出されたという情報や、水素爆発

*3 テレテクタ（商品名）：検出器は小型 GM 計数管 2 個（高低切換使用）、フルスケールは 2, 50 mR/hr (低), 2, 50, 1000 R/hr (高) の 5 段切換でプローブと測定部との間隔は 1～5 m に調整できる。

の恐れ（NRC スタッフが酸素発生量の計算を誤ったため、爆発の可能性はなかったことが4月1日に断定された⁴⁾）などから、NRCの州への示唆をもとに、州知事が予防的手段として行なったものである。結果は、防護対策線量(Protective Action Guide, P.A.G.)⁷⁾、すなわち、全身に対して1～5レム、甲状腺に対し5～25レムの被曝には至らず、退避の必要はなかった。事故後の緊急時計画、体制についても重要なことが多々ある⁸⁾が、ここでは省略する。

6. 事故の教訓

本事故においては、燃料被覆管の90%程度が破損し商業用原子力発電所としては史上最悪の事故になったにもかかわらず、放射線被曝による住民への影響は無視できる程度に抑えられたことは不幸中の幸いであった。これは原子力発電プラントにおける深層防護の設計思想や放射性物質に対して多重の障壁を設ける設計、およびNRCを中心とする支援活動が周辺への影響を軽減したものである。

しかしながら、TMIの事故からは多くの教訓が得られており、これらの教訓を原子力の安全性の一層の向上に反映させることが重要である。

米国においては、NRCが事故を起したB&W炉の運転を停止させ安全点検を行なったのみならず、他の軽水炉に対しても即座にとるべき措置を指示し実施させている。とくに、事故から教訓を抽出する検討グループは当面実施すべき20数項目の改善策^{8,9)}を公表するとともに長期的対策に関する勧告項目⁹⁾をも公表した。また、大統領委員会(KEMENY委員会)⁴⁾では、規制上の問題を含め検討が行われ、勧告内容が10月末に公表されたが、ここでは触れない。

わが国においては、TMI事故を契機に原子力安全委員会および行政当局によって、原子力発電所など原子炉施設における教育訓練を含む安全管理体制の再点検、ECCS機能の解析とそれに伴う必要な措置がとられてきた。

TMI特別委員会においては、事故の調査結果から、長期的観点をも含め基準、審査、設計、運転管理、環境、防災、安全研究の分野において安全確保対策に反映させるべきものとして検討すべき事項(合計52項目)¹⁾の抽出が行なわれた。

抽出事項52項目の内容は省略するが、保健物理に関連する主な教訓的事項は次のように要約できる。

わが国の原子炉施設においては、米国で一般に行われている環境モニタリング項目のほかに、敷地、周辺に設置された据置型の空間線量率連続監視装置（モニタリン

グポスト）による監視が平常時も行なわれており、事故初期の周辺放射線量の把握に関しては米国の場合より有利といえる。ただし、モニタリングポストの事故時における監視能力をさらに向上させるために、測定指示範囲、配置などについて他のモニタリング項目との関連で検討することが必要になろう。

一方、3.1節で述べたように事故後迅速に行なわれた大規模な環境モニタリングの技術及び支援体制に関しては、米国で問題になった点も含めて今後、わが国の原子力発電所などの緊急時の放射線モニタリングの強化について検討するうえで参考となるものである。

また、事故時の放出放射能の的確な把握ならびに予測に寄与するような施設内における事故時モニタリング方式を確立するとともに、TMI事故時のプラント内放射線管理上問題になった事項についても検討し、必要な整備を行なうことが重要と考える。

なお、わが国における防災活動計画を強化するためには、緊急時に有効適切な措置をとりうるよう事故の種類を考慮した現実的な防災計画立案の範囲、実用的な対策指標を定めるとともに、緊急時の通信連絡、輸送の確保なども含め、具体的に定めておくこと、および広報担当者や防災活動担当者に対する教育訓練などが重要である。

参 考 文 献

- 1) 米国原子力発電所事故調査特別委員会第2次報告書、原子力安全委員会(1979)。
- 2) Office of Inspection and Enforcement, US. NRC; Investigation into the March 28, 1979 Three Mile Island Accident by Office of Inspection and Enforcement, NUREG-0600 (1979)。
- 3) 科学技術庁原子力安全局; 原子力安全委員会月報 No. 5 (2巻2号) p. 20 (1979年7月)。
- 4) Reports of the President's Commission on the Accident Three Mile Island (October 31, 1979)。
- 5) Ad Hoc Population Dose Assessment Group; Population Dose and Health Impact of the Accident at the Three Mile Island Nuclear Station, May 10 (1979)。
- 6) HEW, FDA; Federal Register, Accidental Radioactive Contamination of Human and Animal Feeds and Potassium Iodide as a Thyroid-Blocking Agent in a Radiation Emergency (Friday Dec. 15, 1978, Part VII)。

- 7) EPA; Manual of Protective Action Guides and Protective Actions for Nuclear Incidents, EPA-520/1-75-001 (1975).
- 8) Office of Nuclear Reactor Regulation; TMI-2 Lessons Learned Task Status Report and Short-Term Recommendations, NUREG-0578, U.S. NRC. (1979).
- 9) Office of Nuclear Reactor Regulation; TMI-2 Lessons Learned Task Force Final Report, NUREG-0585, U.S. NRC (1979).