

201525022A

厚生労働科学研究費補助金

(健康安全・危機管理対策総合研究事業)

ビキニ水爆関係資料の線量評価に関する研究

平成27年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 明石 真言

放射線医学総合研究所

平成28(2016)年3月

厚生労働科学研究費補助金

(健康安全・危機管理対策総合研究事業)

ビキニ水爆関係資料の線量評価に関する研究

平成27年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 明石 真言

放射線医学総合研究所

平成28(2016)年3月

目次

I. 総括研究報告

- ビキニ水爆関係資料の線量評価に関する研究…………… 1
明石 真言（放射線医学総合研究所）

II. 分担研究報告

1. 物理学的線量評価…………… 1 8
辻村 憲雄（日本原子力研究開発機構）
2. 生物学的線量評価…………… 5 8
児玉 喜明（放射線影響研究所）

I. 総括研究報告

厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）
総括研究報告書

ビキニ水爆関係資料の線量評価に関する研究

研究代表者 明石 真言（放射線医学総合研究所 理事）

研究要旨

昭和29年3月1日から5月14日までの間、マーシャル諸島のビキニ環礁で計6回の水爆実験が行われた。当該水爆実験に関して、平成26年9月及び10月に厚生労働省が関係資料の開示を行った。また、当該水爆実験に関しては、これらの他、日米政府の公文書、文献、記録等が存在すると思われるが、ビキニ水爆実験は、約60年前に行われたものであることから、当時の記録・資料、文献などは限定されている上に、散逸している。このため、班会議では、厚生労働省が開示した資料の整理及び約60年前の散逸した資料の収集を行い、線量評価の可能性について検討を行うことを目的とした。

厚生労働省が開示した資料を中心に整理を行い血液検査データ等を分析した結果、白血球数及び赤血球数の値や臨床症状からは明らかな放射線による影響を認める所見は確認することはできなかった。

また、米軍及びその関係機関によって行われた放射線モニタリング結果と厚生労働省が開示した資料にあった船舶毎の航路を基に推計した外部被ばくによる線量は、放射性降下物の降下時間等に一定の条件を設けて分析した結果、最大でも156 mR（概ね1.12 mSvに相当）と見積もられた。

第五福竜丸以外の船員の内部被ばく線量については、内部被ばく線量の推計に参考となる当時の検査データが存在していないため、既に論文で公開されている第五福竜丸の船員のデータから分析した結果やマーシャル諸島の島民の内部被ばく線量に関する文献のデータによれば、内部被ばくの線量は外部被ばくに比べて極めて小さい値となるものと考えられる。

これらの分析結果から、放射線による健康影響が現れる程度の被ばくがあったことを示す結果は確認できなかった。ただし、今回の分析は、船舶毎に一定の条件の下に推計を行ったものであり、個々人の被ばく線量の評価については、それぞれの船舶内での行動様式を考慮する必要がある。

研究分担者

○辻村 憲雄：日本原子力研究開発機構

主任研究員

○児玉 喜明：放射線影響研究所

生物試料センター長

A. 研究目的

昭和 29 年 3 月 1 日から 5 月 14 日までの間、マーシャル諸島のビキニ環礁で計 6 回の水爆実験が行われた。当該水爆実験に関して、平成 26 年 9 月及び 10 月に厚生労働省が関係資料の開示を行った。

平成 26 年度厚生労働科学特別研究事業「ビキニ水爆関係資料の整理に関する研究」においては、限られた研究期間であったため、可能な範囲で、厚生労働省が開示した資料の検討及び水爆実験当時の資料収集・整理を行った。

平成 27 年度は、平成 26 年度の研究成果を踏まえて、引き続き、厚生労働省が開示した資料の整理及び約 60 年前の散逸した資料の収集を行い、線量評価の可能性について検討することを目的とした。

B. 研究方法

平成 26 年度においては、約 60 年前の被ばく線量を評価するため、当時の記録、論文等の収集・整理を行った。

平成 27 年度においては、引き続き論文等の収集を行うとともに、平成 26 年度研究成果を踏まえて専門家による分析等を行い、班会議において線量評価の可能性について検討した。

なお、資料の活用に当たっては、放射線医学総合研究所 平成 26 年度第 67 回研究倫理審査会の審査の承認を得ている（研究

計画書番号 14-025）。

C. 研究結果

(1) 公開資料による血液検査データ等の分析

平成 27 年度においては、平成 26 年度に引き続き公開資料にある検査記録の整理を行った結果、検査の対象として記載のあった実人員は 159 名であった。そのうち検査結果の記載されていた白血球数 232 回、赤血球数 164 回分の血液検査記録等の分析を行った。（参考資料 1）

白血球数を分析したところ、最も低い値でも $3,300/\text{mm}^3$ （1 名）であり、他には $4,000/\text{mm}^3$ を下回るものは認められていない。また、複数回の検査結果のある者のデータを確認したところ、急激な白血球数の変化も認められなかった。なお、平木らの論文には、白血球数が $3,750/\text{mm}^3$ の方の記載があるが、数日後には回復し、その後安定している。

また、白血球に比べて放射線の影響が遅く現れる赤血球数を分析したところ、最低値は 1 名の $262 \text{ 万}/\text{mm}^3$ であった。この方の白血球数は $6,000/\text{mm}^3$ 、また 8 日後の検査では赤血球数は $312 \text{ 万}/\text{mm}^3$ 、白血球数は $9,200/\text{mm}^3$ であり、消化管や皮膚症状も観察されていない。また、複数回の検査結果のある者のデータを確認したところ、急激な赤血球数の変化も認められなかった。（参考資料 2）

臨床症状では、数名について悪心、嘔吐、下痢などの症状が認められているものの、白血球と赤血球数の減少は認められず、被ばくからの時間、程度、頻度に関する記載がなく、皮膚症状に関する記載はなかった。

(2) 物理学的線量評価について

ビキニ水爆実験当時に、米軍及びその関係機関によって行われた放射線モニタリングの結果（線量率及び放射性降下物沈着密度）に関する報告書が公開されている。これらの観測データは、核種組成情報等と組み合わせることで、マーシャル諸島住民の線量評価に活用されている。この方法論は、水爆実験当時に近海を航行していた船舶等の船員の外部被ばくによる線量の推計に利用できると考えられる。

平成 26 年度においては、米国エネルギー省科学技術局（OSTI）及び国防総省国防技術情報センター（DTIC）等の文献を中心に調査を行い、ビキニ水爆実験後に実施された現地のモニタリングのデータを収集した。

平成 27 年度においては、平成 26 年度に収集したモニタリングのデータを活用し、最も影響が大きいと考えられる 1 回目の水爆実験（ブラボー実験）における放射性降下物の分布図を作成し、近隣の 10 船舶の航路の重ね合わせから外部被ばくによる線量を推計した（推計方法の詳細は、辻村憲雄研究分担者報告を参照）。なお、推計にあたっては、船室等による遮蔽の影響は考慮していない。

第五福竜丸以外の船舶では、放射性降下物が到来した時刻に、その分布の南端付近で操業していた第十二高知丸及び第五明神丸で 156 mR と見積もられた。この値は、放射性降下物からの γ 線の平均エネルギー 0.7 MeV に対する ROT ジオメトリにおける空気カーマ実効線量換算係数 0.817(Sv/Gy)を用いると、 $0.156 \text{ (R)} \times 8.76 \text{ (mGy/R)} \times 0.817 \text{ (Sv/Gy)} = 1.12$

mSv に相当する（詳細は辻村憲雄分担研究者報告を参照）。

第五福竜丸以外の船員の内部被ばく線量については、内部被ばく線量の推計に参考となる当時の検査データが存在していない。第五福竜丸に関しては、外部被ばく線量が詳細に測定されていることから、第五福竜丸の船員の内部被ばく量が推計できれば、第五福竜丸以外の船員について、外部被ばく線量に応じた内部被ばく線量の推計の参考になると考えられる。

三好、熊取の論文には、第五福竜丸に関する外部被ばく線量データ及び内部被ばく線量の分析に必要となる甲状腺体外測定と尿中放射能分析結果等のデータが示されている。それらを基に分析した結果、第五福竜丸船員の外部被ばく線量は、1,900 ~ 6,900 mGy であるが、内部被ばくの線量は、60~330 mSv 程度と推計された。（推計方法の詳細は、参考資料 3 を参照）また、マーシャル諸島の全ての環礁の住民に対する内部被ばくによる線量（甲状腺、赤色骨髓、胃壁及び結腸）が Simon らによって推計されている。マーシャル諸島の北部でビキニ環礁近くのロンゲラップ環礁(Rongelap)、ウチリック環礁(Utrik)、中部のクエゼリン環礁(Kwajalein)、また南部の代表的な島、マジュロ環礁(Majuro) の被ばく線量を外部と内部被ばくに分けて推定している。ここでは、外部被ばくによる線量が、船舶に対する今回の線量推計値と近いマジュロ環礁に着目する。Bouville らによれば、ブラボー実験によるマジュロ環礁住民の外部被ばく線量は 2.2 mGy、これに対して Simon らによれば甲状腺線量は 5.4 mGy と推定することができる。

(3) 生物学的線量評価について

ビキニ水爆実験に関する生物学的線量評価に関して、平成 26 年度においては、文献調査を行い、マーシャル諸島ビキニ環礁での水爆実験に関連した論文 3 編、同年代にクリスマス島で行われた核実験に関連した論文 1 編、計 4 編の論文を収集した。なお、ビキニ水爆実験に係る染色体検査等に関する文献は極めて限定的であり、更なる文献・資料の収集は困難であった。

平成 27 年度においては、生物学的試料から被ばく線量を評価する方法として代表的な歯エナメル質検査及び染色体検査に関して、これまでの知見の収集及び整理を行い、被ばく線量を評価する際の留意点について取りまとめた（児玉喜明研究分担者の報告を参照）。

D. 考察

本研究の目的は、厚生労働省が開示した資料の整理及び約 60 年前の散逸した資料の収集を行い、線量評価の可能性を検討することである。

公開資料による血液検査データの分析結果からは、明らかな放射線による影響を認める所見は確認できなかった。また、悪心、嘔吐、下痢、頭痛などの臨床症状が認められたとの記録があったものの、放射線に特異的な症状ではないことから慎重に評価する必要がある。これらの臨床症状が放射線によるものであれば、皮膚症状が認められる場合も考えられたが、皮膚症状に関する記録は確認できなかったこと、及び血液検査記録の結果でも放射線による影響であることが認められる所見を確認することはで

きなかったことから、これらの臨床症状については、放射線が原因であると考えerことは困難である。

また、ブラボー実験における外部被ばくに関する線量分析については、第五福竜丸を除けば、ビキニ環礁の東側海域に広がる高レベルの放射性降下物の分布域に、特に爆発後 24 時間以内に滞在していた船舶はない。放射性降下物分布の端で漁労活動していたものと、放射性降下物の降下後にその海域を通過した船舶の 2 パターンのみで、これらの船舶の外部被ばくによる線量は最大でも 156 mR (1.12 mSv に相当) と見積もられた。これは、マーシャル諸島の南側の環礁（例えばマジュロ環礁）と同等もしくはそれ以下の被ばく線量である。

また、今回推計した線量の増減要因として、①降雨等による影響、②船舶表面（甲板等）の有限面積、③放射性降下物の継続時間等が考えられる。

①については、放射性降下物が通過する経路上で、どのタイミングで降雨が生じるかによって、増減どちらも起こりうる。すなわち、降雨が、放射性降下物が船舶のちょうど真上に達したときであれば増え、それ以前であれば減る。

②については、船舶表面（甲板等）の面積補正により、放射性降下物が沈着する面積が小さくなれば、線源となる放射性降下物の総量が減り、必然的に線量（率）は下がることになる。

③については、今回の推計では、放射性降下物が放射性降下物の到着時間（TOA: Time of Arrival）の時刻にその全量が沈着すると仮定した。移動中の船舶が降下中（継続した降下時間による）の放射性降下物に

遭遇する場合、今回の推計よりも小さい線量評価となる。

また、内部被ばくについては、第五福竜丸に関しては、外部被ばく線量が詳細に測定されていることから、第五福竜丸の船員の内部被ばく量が推計できれば、ビキニ環礁領域での外部被ばく線量に応じた内部被ばく線量の推計の参考となるものと考えられる。

第五福竜丸船員の外部被ばく線量は、1,700~6,900 mGy（被ばく源となる放射線の殆どはβ線あるいはγ線であり、放射線加重係数が1であることから、ここでは近似的にmSvに読み替えることができる）であるが、船員の内部被ばくの実効線量は、60~330 mSv程度と推計されたこと、及びSimonらの論文では、マーシャル諸島で、緯度上、中から南部の環礁における主要な被ばくは、甲状腺を除いて外部被ばくより起きていることから、第五福竜丸以外の船員の内部被ばく線量については、外部被ばく線量に比べて小さい値となるものと考えられる。

E. 結論

厚生労働省が開示した資料の整理及び約60年前の散逸した資料の収集を行い、線量評価の可能性を検討した。

血液検査記録等の分析からは、明らかに放射線による影響を認める所見を確認することはできなかった。

また、米軍等の放射線モニタリング結果と船舶毎の航路から推計した被ばく線量による線量は、一定の仮定に基づく条件の下に分析した結果、最大でも156 mR（概ね1.12 mSvに相当）と見積もられた。

なお、内部被ばく線量の推計に関しては、外部被ばく線量に比べて極めて小さい値となるものと考えられる。

これらの分析結果から、放射線による健康影響が現れる程度の被ばくがあったことを示す結果は確認できなかった。

ただし、今回の分析は、船舶毎に一定の条件の下に推計を行ったものであり、個々の被ばく線量の評価については、それぞれの船舶内での行動様式を考慮する必要がある。

F. 健康危険情報

該当なし

G. 研究発表

なし

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

なし

I. 参考文献

- (1) マーシャル諸島のビキニ環礁における水爆実験に関する厚生労働省の公開資料（平成26年9月・10月）

※ その他、研究班での検討において参考とした資料

1. ビキニ海域における放射能影響調査報告（第一輯）（昭和30年3月水産庁調査研究部）
2. 昭和29年におけるビキニ海域の放射能影響調査報告（第2集）（昭和30年11月水産庁調査研究部）
3. 平木潔 他. 我々の取り扱ったビキニ

- 水爆症の血液並に骨髓所見について.
総合臨床 4(11) 別冊. 1857-1867 (1955)
4. 三好和夫、熊取敏之. ビギニ放射線症
の臨床並びに血液学的特徴(被ばく後 9
年間の経過を含めて). 日本血液学全書
抜刷第 3 巻. 660-703 (1964).
5. A. Bouville, H. L. Beck, S. L. Simon.
Doses from external irradiation to
Marshall islanders from Bikini and
Enewetak nuclear weapon tests. Health
Phys. 99, 143-156 (2010).
6. S. L. Simon, A. Bouville, C. E. Land, H. L.
Beck. Radiation doses and cancer risks in
the Marshall islands associated with
exposure to radioactive fallout from Bikini
and Enewetak nuclear weapon tests:
summary. Health Phys. 99, 105-123
(2010).
7. S. L. Simon, A. Bouville, D. Melo, H. L.
Beck, R. M. Weinstock. Acute and chronic
intakes of fallout radionuclides by
Marshallese from nuclear weapon testing at
Bikini and Enewetak and related internal
radiation doses. Health Phys. 99,
157-2010 (2010).

公開資料からの臨床データ

| | | | | |
|----|------|----------|-------|---------------|
| 1. | 船舶名 | 第十宝成丸 | 34名 | |
| | 検査月日 | 不明 | | S29.5.24 (報告) |
| | 検査実施 | 不明 | | |
| | 検査項目 | 血液 | | |
| 2. | 船舶名 | 第五明神丸 | 24名 | |
| | 検査月日 | S29.4.5 | | S29.5.24 (報告) |
| | 検査実施 | 東北大学放射線科 | | |
| | 検査項目 | 血液 | | |
| 3. | 船舶名 | 第一金毘羅丸 | 25名 | |
| | 検査月日 | 不明 | | S29.5.24 (報告) |
| | 検査実施 | 不明 | | |
| | 検査項目 | 血液 | 身長、体重 | |

公開資料からの臨床データ

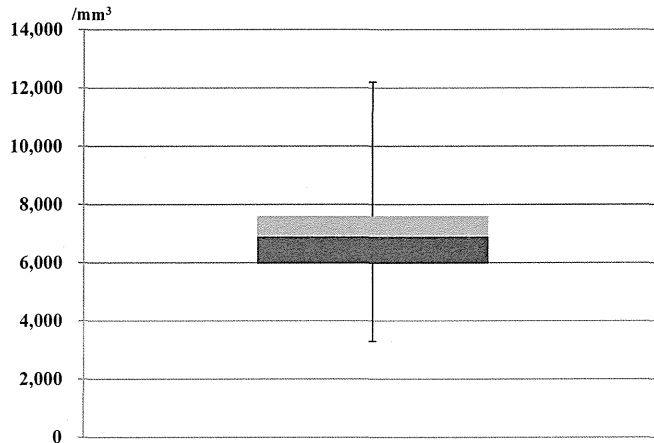
| | | | | |
|----|------|---|-------------------------------|---------------|
| 4. | 船舶名 | 第13光荣丸 | 24名 | |
| | 検査月日 | S29.3.30 | (第一回) 24名 | S29.4.2 (報告) |
| | | S29.4.7 | (第二回) 24名 | S29.4.9 (報告) |
| | | S29.5.4 | (第三回) 8名 | S29.5.26 (報告) |
| | 検査実施 | 国立療養所久里浜病院 | | |
| | 検査項目 | 血液 | 尿 | |
| 5. | 船舶名 | 神通川丸 | 49名 | |
| | 検査月日 | S29.5.23 | ① 49名 ^{※1} (5名入院) | S29.5.27 (報告) |
| | 検査月日 | S29.5.23 | ② 10名 ^{※2} | S29.6.4 (報告) |
| | 検査実施 | 岩手医科大学 大阪病院 | | |
| | 検査項目 | 血液 | | |
| | | <small>※1 岩手医科大学及び大阪病院での検査結果の報告 ※2 ※1のうち、岩手県で実施された検査の結果、症状に多少の疑いがある者について身体検査表の報告</small> | | |
| 6. | 船舶名 | 日安丸 | 3名 | S29.6.4 (報告) |
| | 検査月日 | 不明 | | |
| | 検査実施 | 横浜医大 | | |
| | 検査項目 | 白血球 | | |

公開資料から得られた船員の白血球数

| | 検査回数 | 平均値 (標準偏差) | 最大値 | 最小値 | 中央値(四分位範囲) |
|-----|------|-------------------|--------|-------|------------------------|
| 白血球 | 232回 | 6,870 (±1,430) | 12,200 | 3,300 | 6,900 (5,963-7,600) |

注)単位は、図中に記載されてるものを除き、 $/\text{mm}^3$

なお、検査結果の記載が無い場合や複数回実施している場合もあるため、延べ人数と検査回数は一致しない。

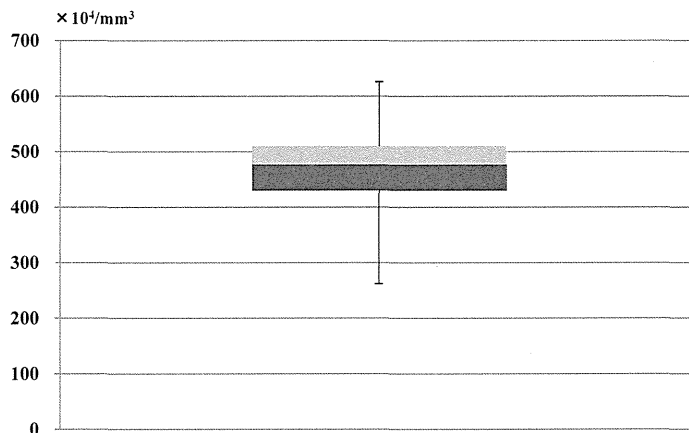


公開資料から得られた船員の赤血球数

| | 検査回数 | 平均値 (標準偏差) | 最大値 | 最小値 | 中央値(四分位範囲) |
|-----|------|---------------|-----|-----|------------------|
| 赤血球 | 164回 | 471 (±67) | 626 | 262 | 477 (430-510) |

注)単位は、図中に記載されてるものを除き、 $/10^4 \times \text{mm}^3$

なお、検査結果の記載が無い場合や複数回実施している場合もあるため、延べ人数と検査回数は一致しない。



参考資料 3

第五福竜丸の内部被ばくの線量の推計方法

1 推計方法

第五福竜丸船員については、甲状腺計測や尿バイオアッセイの結果が得られていることから[1]、これらに基づき内部被ばく線量を試算した。その方法は、国際放射線防護委員会（ICRP）が推奨する方法に準拠するとともに、測定時には未検出となった短半減期核種については、Simon ら[2]が島民の内部被ばく線量推定において考慮した 63 核種を対象とし、それらの放射能比は Hicks[3]の計算値を参考とした。表 1 に考慮した 63 核種とその物理半減期、胃腸管吸収割合（ f_1 ）及び経口摂取における線量係数を示した。線量係数は、日本原子力研究所（現、日本原子力研究開発機構：JAEA）で開発された IDEC コードを用いて得た。摂取経路は、フォーアウトによって船上に沈降した粒子の大きさが大きいことから、経口摂取を仮定した。摂取時期は、Simon らの考え方を参考にして、ブラボー水爆実験の爆発時刻から 9 時間後とした。試算した第五福竜丸船員の内部被ばく線量は、Simon らが評価したロンゲラップ島民の内部被ばく線量推定値との比較により、その妥当性を評価した。

2 推計結果

(1) 甲状腺計測に基づく内部被ばく線量評価

表 2 は、文献[1]から引用したデータと当時の資料を比較し、誤記と思われた箇所を修正した第五福竜丸船員の甲状腺計測のデータである。同文献には、複数回の測定値、甲状腺残留放射能の有効半減期は 4.8 ～ 7 日であること、第 1 日目の沈着量は 3.3～28.1 μCi であり、照射線量は 19.6～118 rad との記録が残されている（表 3）。

表 3 から、4 名の甲状腺線量は 0.2 ～ 1.18 Gy となる。甲状腺計測が行われた測定日を考慮すると、 ^{131}I 以外の放射性ヨウ素（ ^{132}I 、 ^{133}I 、 ^{135}I ）は検出されておらず、表 3 中の積算線量は ^{131}I による甲状腺線量を評価したものと推察される。本研究では、 ^{131}I 以外の核種を含めた線量評価を行うため、Hicks が計測した核種毎の放射能比と表 2 のデータから求めた ^{131}I の初期摂取量から、 ^{131}I を除く 62 核種の初期摂取量を算定した。

表 2 の甲状腺計測の結果から、T2、T6、T7、T8 の初回または 2 回目の計数値はそれぞれ 248、170、222、204 cpm となるが、表 3 にある実効半減期を用いて第 1 日目の計数値をブラボー水爆実験が行われた 3 月 1 日として計算すると 1.75×10^4 、 6.60×10^4 、 1.57×10^4 、 8.78×10^4 cpm となる。この計数値が表 3 中の放射能に対応するものとして比較すると、図 1 に示す様な関係が得られる。同図の近似直線の傾きが、甲状腺計測に用いられた検出器の計数効率に相当すると考えられる。図 2 に示すのは表 2 に示した甲状腺計測の結果をプロットしたグラフであるが、被検者毎に得られた全データを用いて適合関数を決定し、それから実効半減期を求めた。その結果、T2、T6、T7、T8 の実効半減期は 6.6、8.3、7.1、9.1 日となり、その他の被検者についても ^{131}I の実効半減期に近い数値が得られた。従来の評価では T8 の実効半減期は 4.8 日であり、そのために T8 よりも後に測定を受け、かつ、測定値の高い T2 の甲状腺線量の方が低くなっているが、今回の評価では T2 の甲状腺線量の方が高くなっており、 ^{131}I の実効半減期がほぼその物理半減期によって決定されることを考えるとより自然な結果となっている。実効半減期が異なった理由としては、用い

たデータの数や有効桁数の扱いの違いなどが考えられる。例えば、T8の実効半減期は当時4.8日（表3）と評価されているが、これは表2に示す最初の2データのみを用いて計算すると4.72日となり、ほぼ再現する。

表4に、 ^{131}I 以外の核種も含めた7名の船員の内部被ばく線量を今回新たに算定した結果を示す。7名の実効線量と甲状腺線量は、それぞれ0.03~0.33 Sv、0.15~1.89 Svの範囲であった。摂取時刻を爆発から9時間後とした場合、甲状腺線量全体に占める ^{131}I の線量寄与割合は21.5%となる。従前の評価と比較するため、 ^{131}I のみによる甲状腺線量を計算すると、0.41 Sv (T2)、0.09 Sv (T6)、0.25 Sv (T7)、0.07 Sv (T8)となるが、従前の評価で実効半減期が7日であったT2とT7については比較的良好一致を見ている（表3において、1 rad = 0.01 Gy、また、 ^{131}I から放出される β 線及び γ 線の放射線加重係数が1であるので、臓器吸収線量1 Gyを等価線量1 Svに置き換えると、T2は0.26 Sv、T7は0.20 Svとなる）。

表1 内部被ばく線量評価の対象核種 (1/2)

| No. | 核種 | 半減期 | f_1 | 線量係数 (Sv/Bq) | | | | |
|-----|---------|-------|---------|--------------|---------|---------|---------|---------|
| | | | | 実効線量 | 赤色骨髓 | 甲状腺 | 胃 | 結腸 |
| 1 | Fe-55 | 2.7 a | 1.0E-01 | 3.3E-07 | 1.1E-09 | 8.5E-11 | 9.2E-11 | 2.6E-10 |
| 2 | Cu-64 | 13 h | 5.0E-01 | 1.2E-07 | 1.9E-11 | 1.2E-11 | 1.7E-10 | 6.8E-10 |
| 3 | As-77 | 39 h | 5.0E-01 | 4.0E-07 | 2.5E-11 | 2.4E-11 | 2.8E-10 | 2.8E-09 |
| 4 | Br-83 | 2.4 h | 1.0E+00 | 4.5E-08 | 7.3E-12 | 7.3E-12 | 3.0E-10 | 1.5E-11 |
| 5 | Rb-88 | 18 m | 1.0E+00 | 9.0E-08 | 2.6E-12 | 2.2E-12 | 7.3E-10 | 4.9E-12 |
| 6 | Sr-89 | 51 d | 3.0E-01 | 2.6E-06 | 4.8E-09 | 2.0E-10 | 8.7E-10 | 1.4E-08 |
| 7 | Sr-90 | 29 a | 3.0E-01 | 2.8E-05 | 1.8E-07 | 6.6E-10 | 9.0E-10 | 1.3E-08 |
| 8 | Y-90 | 64 h | 1.0E-04 | 2.7E-06 | 3.7E-13 | 1.3E-14 | 1.1E-09 | 2.1E-08 |
| 9 | Sr-91 | 9.6 h | 3.0E-01 | 6.6E-07 | 1.6E-10 | 2.0E-11 | 8.5E-10 | 3.8E-09 |
| 10 | Y-91m | 50 m | 1.0E-04 | 1.2E-08 | 2.2E-12 | 6.9E-14 | 4.9E-11 | 2.6E-11 |
| 11 | Sr-92 | 2.7 h | 3.0E-01 | 4.4E-07 | 6.4E-11 | 1.1E-11 | 5.3E-10 | 2.7E-09 |
| 12 | Y-92 | 3.5 h | 1.0E-04 | 5.2E-07 | 4.8E-12 | 1.2E-13 | 1.4E-09 | 2.6E-09 |
| 13 | Y-93 | 10 h | 1.0E-04 | 1.2E-06 | 4.4E-12 | 9.9E-14 | 1.3E-09 | 8.3E-09 |
| 14 | Zr-95 | 64 d | 1.0E-02 | 9.6E-07 | 4.7E-10 | 4.2E-11 | 3.8E-10 | 5.1E-09 |
| 15 | Nb-95 | 35 d | 1.0E-02 | 5.9E-07 | 1.8E-10 | 1.3E-11 | 2.8E-10 | 2.8E-09 |
| 16 | Zr-97 | 17 h | 1.0E-02 | 2.1E-06 | 1.3E-10 | 3.9E-12 | 1.2E-09 | 1.5E-08 |
| 17 | Nb-97m | 53 s | 1.0E-02 | 1.3E-09 | 9.8E-14 | 5.2E-15 | 7.4E-12 | 2.1E-12 |
| 18 | Mo-99 | 66 h | 1.0E+00 | 6.1E-07 | 6.1E-10 | 2.5E-10 | 7.4E-10 | 4.9E-10 |
| 19 | Tc-99m | 6 h | 5.0E-01 | 2.3E-08 | 4.3E-12 | 4.7E-11 | 5.5E-11 | 6.7E-11 |
| 20 | Ru-103 | 39 d | 5.0E-02 | 7.4E-07 | 1.6E-10 | 6.7E-11 | 3.1E-10 | 4.3E-09 |
| 21 | Rh-103m | 56 m | 5.0E-02 | 4.0E-09 | 5.0E-15 | 3.3E-15 | 2.6E-11 | 5.7E-12 |
| 22 | Ru-105 | 4.4 h | 5.0E-02 | 2.7E-07 | 2.2E-11 | 1.7E-12 | 5.0E-10 | 1.5E-09 |
| 23 | Rh-105 | 35 h | 5.0E-02 | 3.7E-07 | 1.2E-11 | 3.0E-12 | 1.9E-10 | 2.7E-09 |
| 24 | Ru-106 | 370 d | 5.0E-02 | 7.0E-06 | 1.5E-09 | 1.4E-09 | 3.1E-09 | 4.5E-08 |
| 25 | Pd-109 | 14 h | 5.0E-03 | 5.6E-07 | 8.0E-13 | 9.6E-14 | 4.8E-10 | 4.1E-09 |
| 26 | Ag-112 | 3.1 h | 5.0E-02 | 4.5E-07 | 1.2E-11 | 1.4E-12 | 1.4E-09 | 2.1E-09 |
| 27 | Cd-115 | 53 h | 5.0E-02 | 1.4E-06 | 6.4E-11 | 9.8E-12 | 4.6E-10 | 1.0E-08 |
| 28 | Cd-117 | 2.5 h | 5.0E-02 | 2.9E-07 | 2.1E-11 | 1.4E-12 | 6.2E-10 | 1.5E-09 |
| 29 | In-117m | 2 h | 2.0E-02 | 1.2E-07 | 5.2E-12 | 1.7E-13 | 4.5E-10 | 4.3E-10 |
| 30 | Sn-121 | 27 h | 2.0E-02 | 2.3E-07 | 2.3E-12 | 2.0E-13 | 1.3E-10 | 1.8E-09 |
| 31 | Sb-125 | 2.8 a | 1.0E-01 | 1.1E-06 | 1.5E-09 | 2.6E-10 | 4.9E-10 | 4.1E-09 |
| 32 | Sn-127 | 2.1 h | 2.0E-02 | 2.1E-07 | 2.4E-11 | 9.3E-13 | 6.2E-10 | 8.2E-10 |

表1 内部被ばく線量評価の対象核種 (2/2)

| No. | 核種 | 半減期 | f _i | 線量係数 (Sv/Bq) | | | | |
|-----|---------|-------|----------------|--------------|---------|---------|---------|---------|
| | | | | 実効線量 | 赤色骨髄 | 甲状腺 | 胃 | 結腸 |
| 33 | Sb-127 | 3.9 d | 1.0E-01 | 1.7E-06 | 3.0E-10 | 2.9E-11 | 5.7E-10 | 1.2E-08 |
| 34 | Te-129 | 70 m | 3.0E-01 | 6.6E-08 | 9.4E-13 | 7.5E-13 | 4.0E-10 | 1.2E-10 |
| 35 | Sb-129 | 4.4 h | 1.0E-01 | 4.4E-07 | 4.2E-11 | 4.1E-12 | 7.2E-10 | 2.4E-09 |
| 36 | Te-131m | 30 h | 3.0E-01 | 2.0E-06 | 2.6E-10 | 1.8E-08 | 6.7E-10 | 5.9E-09 |
| 37 | I-131 | 8 d | 1.0E+00 | 2.2E-05 | 1.0E-10 | 4.3E-07 | 3.0E-10 | 1.2E-10 |
| 38 | Te-132 | 78 h | 3.0E-01 | 3.8E-06 | 5.3E-10 | 3.1E-08 | 7.6E-10 | 1.3E-08 |
| 39 | I-132 | 2.3 h | 1.0E+00 | 2.9E-07 | 2.6E-11 | 3.4E-09 | 6.3E-10 | 4.6E-11 |
| 40 | Te-133m | 55 m | 3.0E-01 | 3.3E-07 | 1.3E-11 | 3.2E-09 | 6.7E-10 | 2.1E-10 |
| 41 | I-133 | 21 h | 1.0E+00 | 4.3E-06 | 4.7E-11 | 8.2E-08 | 5.5E-10 | 1.1E-10 |
| 42 | I-135 | 6.6 h | 1.0E+00 | 9.3E-07 | 4.0E-11 | 1.6E-08 | 5.4E-10 | 7.3E-11 |
| 43 | Cs-137 | 30 a | 1.0E+00 | 1.4E-05 | 1.3E-08 | 1.3E-08 | 1.3E-08 | 1.5E-08 |
| 44 | Ba-139 | 83 m | 2.0E-01 | 1.3E-07 | 2.9E-12 | 3.8E-13 | 6.9E-10 | 3.0E-10 |
| 45 | Ba-140 | 13 d | 2.0E-01 | 2.6E-06 | 1.2E-09 | 8.7E-11 | 6.3E-10 | 1.7E-08 |
| 46 | La-140 | 1.7 d | 5.0E-04 | 2.0E-06 | 2.6E-10 | 5.2E-12 | 1.1E-09 | 1.3E-08 |
| 47 | La-141 | 3.9 h | 5.0E-04 | 3.8E-07 | 9.4E-13 | 3.5E-14 | 9.3E-10 | 2.0E-09 |
| 48 | Ce-141 | 33 d | 5.0E-04 | 7.1E-07 | 1.9E-11 | 3.0E-13 | 2.2E-10 | 5.5E-09 |
| 49 | La-142 | 91 m | 5.0E-04 | 1.9E-07 | 1.9E-11 | 8.9E-13 | 8.5E-10 | 4.7E-10 |
| 50 | Ce-143 | 33 h | 5.0E-04 | 1.1E-06 | 3.5E-11 | 3.6E-13 | 5.6E-10 | 8.3E-09 |
| 51 | Pr-143 | 14 d | 5.0E-04 | 1.2E-06 | 1.7E-12 | 1.1E-14 | 3.6E-10 | 9.3E-09 |
| 52 | Ce-144 | 280 d | 5.0E-04 | 5.3E-06 | 1.9E-10 | 1.2E-11 | 1.1E-09 | 4.2E-08 |
| 53 | Pr-144 | 17 m | 5.0E-04 | 5.1E-08 | 3.4E-14 | 2.7E-15 | 4.1E-10 | 1.0E-11 |
| 54 | Pr-145 | 6 h | 5.0E-04 | 4.1E-07 | 4.6E-13 | 1.6E-14 | 7.0E-10 | 2.6E-09 |
| 55 | Nd-147 | 11 d | 5.0E-04 | 1.1E-06 | 3.1E-11 | 2.2E-13 | 3.6E-10 | 8.2E-09 |
| 56 | Pm-149 | 53 h | 5.0E-04 | 1.0E-06 | 2.1E-12 | 2.5E-14 | 4.2E-10 | 7.8E-09 |
| 57 | Nd-149 | 1.7 h | 5.0E-04 | 1.3E-07 | 3.8E-12 | 6.6E-14 | 4.5E-10 | 5.5E-10 |
| 58 | Pm-151 | 28 h | 5.0E-04 | 7.4E-07 | 3.6E-11 | 3.5E-13 | 4.2E-10 | 5.2E-09 |
| 59 | Sm-153 | 46 h | 5.0E-04 | 7.5E-07 | 9.5E-12 | 2.4E-14 | 3.3E-10 | 5.7E-09 |
| 60 | U-237 | 6.8 d | 2.0E-02 | 7.7E-07 | 3.7E-11 | 9.9E-13 | 2.7E-10 | 5.7E-09 |
| 61 | U-240 | 14 h | 2.0E-02 | 1.1E-06 | 2.7E-11 | 8.4E-13 | 8.5E-10 | 8.1E-09 |
| 62 | Np-240m | 7.2 m | 5.0E-04 | 1.5E-08 | 1.5E-13 | 1.0E-14 | 1.2E-10 | 1.1E-12 |
| 63 | Np-239 | 2.4 d | 5.0E-04 | 8.7E-07 | 2.6E-11 | 1.5E-13 | 3.4E-10 | 6.0E-09 |

表2 甲状腺計測の結果

| 測定日 | T1 | T2 | T3 | T5 | T6 | T7 | T8 |
|-----------|----|-----|-----|-----|-----------|------------|------------|
| 1954/3/26 | | | | | | 1167 | |
| 1954/4/12 | | | | | | | <u>204</u> |
| 1954/4/13 | | 248 | | 138 | 170 | 222 | |
| 1954/4/17 | 71 | 168 | 152 | 121 | | | |
| 1954/4/19 | | | | | <u>74</u> | <u>118</u> | <u>73</u> |
| 1954/5/7 | 10 | 20 | 30 | 35 | 21 | 19 | 27 |

注) 文献[1]から引用。数値の単位は cpm。なお、文献[1]にある 4/13 の T8 のデータは 4/12 に取得されている。また、4/17 の T6、T7、T8 のデータは 4/19 に取得されていることから、修正した。

表3 甲状腺の放射能と照射線量

| Case | 実効半減期 (day) | 1日目の 放射能(μCi) | 積算線量 (rad) |
|------|----------------|-------------------------------|---------------|
| T7 | 7 | 3.3 | 19.6 |
| T2 | 7 | 4.4 | 26.3 |
| T6 | 5 | 19.0 | 80.5 |
| T8 | 4.8 | 28.1 | 118.0 |

注) 文献[1]から引用

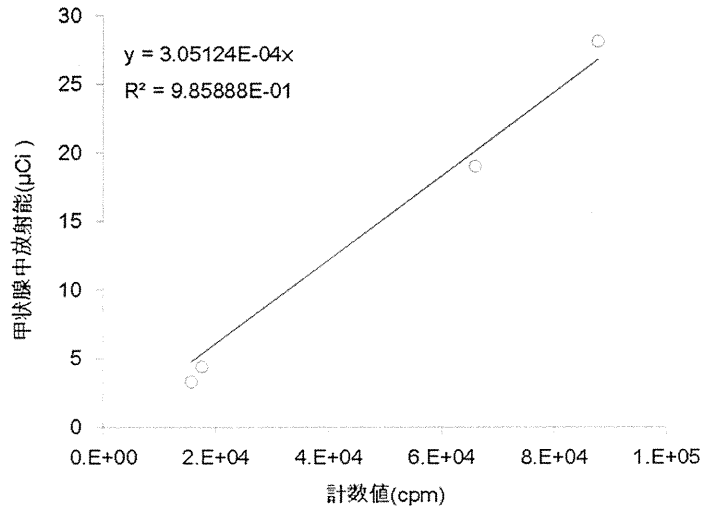


図1 甲状腺計測における計数値と放射能の関係

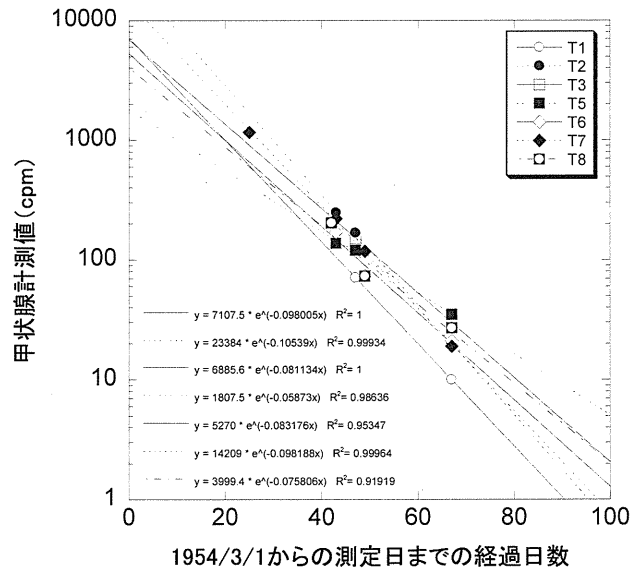


図2 甲状腺計測値

表4 甲状腺計測に基づく第五福竜丸船員の内部被ばく線量

| | 全核種(Sv) | | | | |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 実効線量 | 赤色骨髄 | 甲状腺 | 胃 | 結腸 |
| T1 | 0.10 | 0.01 | 0.58 | 0.07 | 0.46 |
| T2 | 0.33 | 0.02 | 1.89 | 0.22 | 1.52 |
| T3 | 0.10 | 0.01 | 0.57 | 0.07 | 0.46 |
| T5 | 0.03 | 0.00 | 0.15 | 0.02 | 0.12 |
| T6 | 0.08 | 0.00 | 0.44 | 0.05 | 0.35 |
| T7 | 0.20 | 0.01 | 1.16 | 0.14 | 0.93 |
| T8 | 0.06 | 0.00 | 0.33 | 0.04 | 0.27 |
| I-131線量割合 | 6.34E-02 | 5.66E-03 | 2.15E-01 | 1.28E-03 | 7.46E-05 |

(2) 尿バイオアッセイに基づく内部被ばく線量評価

表5に、文献[1]に示された尿バイオアッセイの結果を示す。同結果では尿中⁸⁹Sr放射能が得られており、ブラボー実験実施日から尿採取日までの経過日数（25日または28日）に対する尿中排泄率を用いて⁸⁹Sr摂取量を求め、これから他核種の摂取量をHicksが計算した放射能比に基づき計算した。なお、一部の被検者については、尿中放射能はSrとBaの合計値として得られているが、ここでは全量を⁸⁹Srと見なした。表6に船員の実効線量及び甲状腺線量の計算結果を示す。後者は、甲状腺への線量寄与が高い8核種を考慮した。

表5 尿バイオアッセイ結果

| Case | 採取日 | Total FP (d/m/l) | Total activity/24 hrs (d/m/24h) | % Sr-89 | % Ba-140 |
|------|-----------|------------------|---------------------------------|---------|----------|
| T1 | 1954/3/29 | 6100 | 3540 | 5 | 8.2 |
| T2 | 1954/3/29 | 6000 | 3360 | 0.4 | 4.0 |
| T3 | 1954/3/29 | 8400 | 5380 | 9 | 4.6 |
| T5 | 1954/3/29 | 54000 | 76680 | 6.9 | * |
| T6 | 1954/3/29 | 1300 | 1170 | | |
| T7 | 1954/3/26 | 550 | 495 | 18 | * |
| T8 | 1954/3/26 | 230 | 300 | 21 | * |

* Sr+Ba

注) 文献[1]から引用

表6 尿バイオアッセイに基づく第五福竜丸船員の内部被ばく線量（実効線量・甲状腺線量）

| 実効線量 (mSv) | 甲状腺等価線量(mGy) | | | | | | | | | Total |
|---------------|--------------|-------|-------|-------|--------|---------|--------|---------|------|-------|
| | I-131 | I-132 | I-133 | I-135 | Te-129 | Te-131m | Te-132 | Te-133m | | |
| T1 | 8 | 12 | 0 | 32 | 9 | <0.1 | 0 | 3 | <0.1 | 56 |
| T2 | 1 | 1 | <0.1 | 2 | 1 | <0.1 | <0.1 | 0 | <0.1 | 4 |
| T3 | 21 | 33 | 1 | 88 | 22 | <0.1 | 1 | 8 | <0.1 | 152 |
| T5 | 230 | 357 | 9 | 958 | 245 | <0.1 | 10 | 82 | <0.1 | 1660 |
| T6 | 3 | 4 | 0 | 11 | 3 | <0.1 | 0 | 1 | <0.1 | 20 |
| T7 | 3 | 5 | 0 | 13 | 3 | <0.1 | 0 | 1 | <0.1 | 22 |
| T8 | 2 | 3 | 0 | 9 | 2 | <0.1 | 0 | 1 | <0.1 | 16 |

3 考察

第五福竜丸船員の内部被ばく線量を、当時得られた甲状腺計測及び尿バイオアッセイの結果に基づき算定した。個人毎に見ると、2つの方法で得られた内部被ばく線量には乖離があるものの、全体的に見ると線量のオーダーは一致する結果が得られた。尿バイオアッセイによる方法は、分析された ^{89}Sr の放射能割合が被検者によって大きく異なり、また、個人の代謝の違いによる影響が大きく、1試料のみから内部被ばく線量を評価することは注意を要するものと思われる。Hicks が計算した核種の放射能比及び尿排泄率から、採取日における尿試料中の ^{89}Sr の放射能は全放射能の約30%と計算されるが、尿バイオアッセイの結果では ^{89}Sr の割合はそこまで高くなく、また計算上は微量となるはずの ^{140}Ba が ^{89}Sr と同程度検出されている理由も現時点で不明である。

甲状腺計測にはNaI検出器が用いられたものと推察されるが、検出器の仕様、測定条件や校正方法に関する情報は収集することが出来なかった。しかしながら、甲状腺に集積した放射性ヨウ素に対する直接計測であり、測定自体の誤差は比較的小さいものだったと考えられる。図3には、爆発からの経過時刻に伴う甲状腺線量に占める ^{131}I の線量寄与割合の変化を示した。今回の線量評価では摂取時刻を爆発の9時間後に設定したが、爆発から数時間後から1日以内では変化が小さく、過小評価の可能性は低いと考えられる。

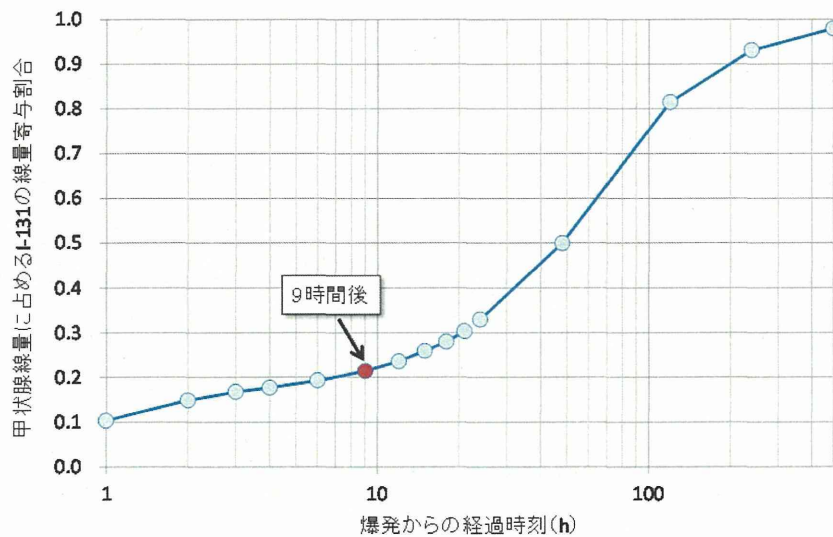


図3 摂取時刻による ^{131}I の甲状腺線量の寄与割合の変化

第五福竜丸船員の内部被ばく線量結果を表4及び表6に示すが、甲状腺線量の最大値は2 Gy程度となった。表7には、Simonらが評価したマーシャル諸島島民の代表的集団(成人)の累積内部被ばく線量及び外部被ばく線量を文献[2]から引用した。これらの線量は、マーシャル諸島で行われた全核実験による合計である。第五福竜丸船員の内部被ばく線量の比較対象となるのは、同様にブラボー水爆実験直後のフォールアウトに曝されたロンゲラップ島民の結果であるが、甲状腺線量については第五福竜丸船員(最大値)がロンゲラップ島民の数分の一程度であった。甲状腺線量に次いで大きいのが結腸線量であるが、第五福竜丸船員の最大値が1.5 Gy (Sv)に対し、ロンゲラップ島民では2.8 Gyであった。なお、結腸線量に寄与するのは ^{239}Np 、 ^{240}U 、 ^{97}Zr などであった。以上の結果は、ロンゲラップ島民が第五福竜丸船員と類似した時期のフォールアウトによる曝露であること、また、放射性プルームの曝露時間としてはロンゲラップ島民の方が長かったと推測されることから

合理的な説明がつくものと思われる。第五福竜丸は被災した海域から直ちに離れたのに対し（図 4）、ロンゲラップ島民は爆発の 51 時間後に避難したとされる [4]。ただし、今回の第五福竜丸船員の内部被ばく線量評価は、放射性核種の摂取日を 3 月 1 日のみとした条件（急性摂取シナリオ）で行っているため、過大評価の可能性が高い。また、内部被ばくに寄与する各臓器線量で最も大きいのは甲状腺であることは第五福竜丸船員とロンゲラップ島民について一致している。一方、甲状腺線量に対する外部被ばく線量（全身）の比は両者で大きく異なり、第五福竜丸船員の方がロンゲラップ島民よりも高く、すなわち、前者の方が内部被ばくに比べて外部被ばくの割合が高い。今回の調査では、文献[1]に示されたデータのみから、第五福竜丸船員（T1~T8）の外部被ばく線量（全身）は 2.5~6.9 Sv であり、これまで報告書と大きく異なるものではなかった。これに対する内部被ばくによる甲状腺線量の比は 0.022~0.429（幾何平均値 0.136）となるが、ロンゲラップ島民では同比は 4.75（=7600 mGy/1600 mGy）となる（表 8）。この違いの理由としては、ロンゲラップ島民やその他の島民は飲食物を介しての放射性核種の摂取が継続されたこと、ロンゲラップ島民の避難後における外部被ばく線量は比較的小さいこと（第五福竜丸船員の外部被ばく線量は爆発当日と 2 日目から帰港までの期間で約半々と推定されている）などが考えられる。

表 7 4つの代表的集団に対する累積内部被ばく及び外部被ばく線量

| Organ/Mode of exposure | Population group | | | | |
|-------------------------------|------------------|---------------------|-----------------|---------------------------|------|
| | Majuro residents | Kwajalein residents | Utrik community | Rongelap Island community | |
| Thyroid | | | | | |
| Acute internal | | 22 | 66 | 740 | 7600 |
| Chronic internal | | 0.76 | 1.3 | 25 | 14 |
| Total internal | | 23 | 67 | 760 | 7600 |
| RBM | | | | | |
| Acute internal | | 0.11 | 0.25 | 2.3 | 25 |
| Chronic internal | | 0.98 | 1.7 | 33 | 17 |
| Total internal | | 1.1 | 2 | 35 | 42 |
| Stomach wall | | | | | |
| Acute internal | | 0.32 | 1.1 | 16 | 530 |
| Chronic internal | | 0.75 | 1.3 | 24 | 14 |
| Total internal | | 1.1 | 2.4 | 40 | 540 |
| Colon | | | | | |
| Acute internal | | 4.4 | 12 | 180 | 2800 |
| Chronic internal | | 0.99 | 1.7 | 32 | 17 |
| Total internal | | 5.4 | 14 | 210 | 2800 |
| Whole body (external dose) | | | | | |
| | | 9.8 | 22 | 130 | 1600 |

文献[2]から引用 単位は mGy

第五福竜丸以外の漁船船員の内部被ばく線量については、個人の測定データが得られていないために直接的な評価は行えないものの、第五福竜丸船員や Simon らのマーシャル諸島島民の内部被ばく線量推定値を基に、各漁船の航路情報やマーシャル諸島海域における放射性核種の拡散状況等から推定できると考える。ただし、大まかな推計としては、公開された漁船の航路情報から今回新たに算定された各漁船の外部被ばく線量が最大でも 1 mSv 程度であること[5]、第五福竜丸船員が受けた内部被ばく線量は外部被ばく線量に比べて小さく、

内部被ばく線量（実効線量）では外部被ばく線量（全身）の1割にも満たないことから（表8）などから、その他の漁船船員の内部被ばく線量が特別高いとされる根拠は見当たらなかった。

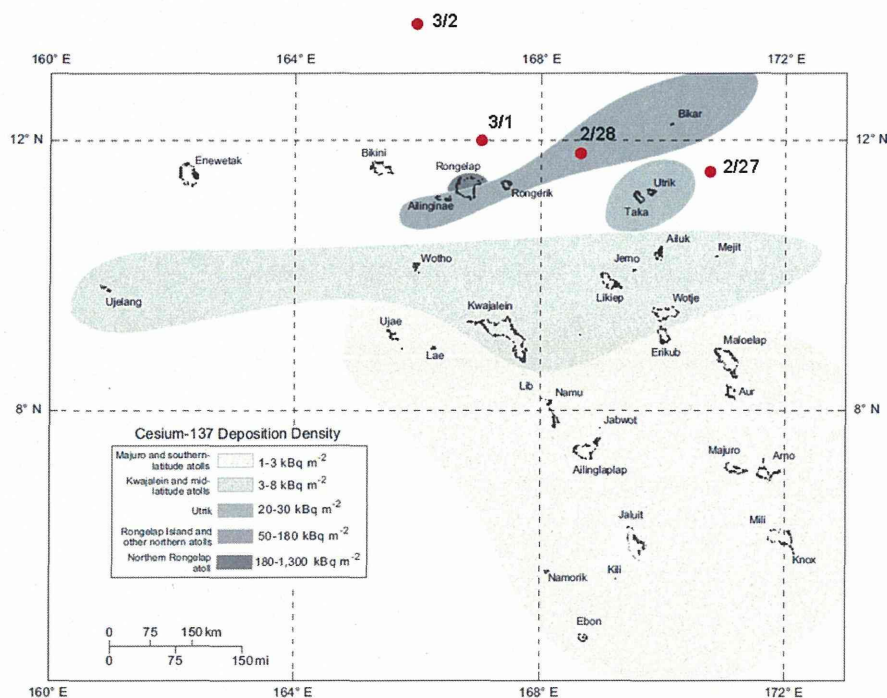


Fig. 2. Geographical variation of total (cumulative) ^{137}Cs deposited (kBq m^{-2}) from all Marshall Islands nuclear tests (see Table 5) illustrating four areas with similar deposition. Taongi Atoll, located beyond the boundaries of the map at $14^{\circ} 32'$ north latitude, is not shown and not included in the range of depositions shown in the key for the northern atolls. Shaded areas also describe groups of atolls with similar values of organ dose (Table 5) and cancer risk (Table 11).

図4 第五福竜丸の航路と ^{137}Cs の沈着マップ

注) 文献[2]から引用した図に追記して作成

表8 第五福竜丸船員の外部被ばく線量と内部被ばく線量の比較

| | 外部被ばく線量 (Sv) | | | 内部被ばく線量 (Sv) | | 内部/外部 | |
|----|--------------|-------|-----|--------------|------|-------|-------|
| | 1日目 | 1日目以降 | ①合計 | ②実効線量 | ③甲状腺 | ②/① | ③/① |
| T1 | 2.9 | 2.1 | 5.0 | 0.10 | 0.58 | 0.020 | 0.116 |
| T2 | 2.6 | 1.8 | 4.4 | 0.33 | 1.89 | 0.074 | 0.429 |
| T3 | 2.0 | 1.1 | 3.1 | 0.10 | 0.57 | 0.032 | 0.184 |
| T5 | 4.3 | 2.6 | 6.9 | 0.03 | 0.15 | 0.004 | 0.022 |
| T6 | 1.8 | 0.7 | 2.5 | 0.08 | 0.44 | 0.030 | 0.174 |
| T7 | 1.9 | 0.8 | 2.7 | 0.20 | 1.16 | 0.074 | 0.428 |
| T8 | 3.6 | 2.1 | 5.7 | 0.06 | 0.33 | 0.010 | 0.058 |
| | 幾何平均値 | | | | | 0.024 | 0.136 |

注) 表中の外部被ばく線量は、文献[1]に示された単位 (rad) の数値から、 $1 \text{ rad} = 10 \text{ mGy}$ 、 1 Gy は 1 Sv として近似的に換算した。内部被ばく線量は表4の数値を再掲した。

4 結論

第五福竜丸船員の内部被ばく線量を、当時行われた甲状腺計測及び尿バイオアッセイの結果に基づき評価した。その結果、甲状腺線量の最大値は約 2 Gy であり、Simon らが評価したロンゲラップ島民の甲状腺線量の