

数分の一程度となった。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、公開された航路情報を基に今回新たに算定された各漁船の外部被ばく線量（最大でも 1 mSv 程度）よりも小さかったと推定される。

5 参考文献

- [1] 三好和夫、熊取敏之. ビキニ放射線症の臨床並びに血液学的特徴(被曝後 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).
- [2] 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).
- [3] H. C. Hicks. Results of calculations of external gamma radiation exposure rates from local fallout and the related radionuclides compositions of selected U.S. Pacific events. UCRL-53705. Lawrence Livermore National Laboratory (1984).
- [4] National Cancer Institute. Estimation of the baseline number of cancers among Marshallese and the number of cancers attributed to exposure to fallout from nuclear weapons testing conducted in the Marshall islands (2004).
- [5] 辻村憲雄. 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）分担研究報告書 (2016).

6 その他

当該分析は、栗原 治氏、金ウンジュ氏（放射線医学総合研究所 REMAT 線量評価室）の協力を得て実施した。

II. 分担研究報告

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）
分担研究報告書

ビキニ水爆関係資料の線量評価に関する研究（物理学的線量評価）

研究分担者 辻村 憲雄（国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構）

研究要旨

昭和 29 年 3 月から 5 月にかけて行われたビキニ水爆実験によって被災した漁船の乗組員について、当時の記録・資料等を収集・整理し、それをもとに外部被ばくによる線量を推計した。

(1) ビキニ水爆実験当時に、米国によって行われた放射線モニタリング（線量率及び放射性降下物沈着密度）の結果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、核種組成等の情報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漁船等の乗組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。

(2) 1980 年代に米国で開発された放射性降下物分布計算コードの考え方を利用して、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た。さらに、当該分布図と漁船の航路の重ね合わせから外部被ばくによる線量を推計するプログラムを作成した。当該プログラムを利用して代表的漁船（近海で操業していた 10 隻、第五福竜丸を除く）について、外部被ばくによる線量を計算した。これら 10 隻の漁船は、ビキニ環礁の東側に主として広がる放射性降下物が降下する領域の端で漁労活動を行っていたか、放射性降下物がほぼ降下し終わった後にその海域を通過したかのいずれかであり、外部被ばくによる線量は最大で 156 mR（1.12 mSv 相当）と推計された。

A. 研究目的

昭和 29 年 3 月 1 日から 5 月 14 日にかけて、米国は、太平洋諸島信託統治領（現在のマーシャル諸島）のビキニ環礁及びエニウェトク環礁においてキャッスル作戦と名付けられた計 6 回の核実験（以下、「ビキニ水爆実験」と記す）を実施した。それによって発生した多量の放射性降下物は、近海で操業していた日本の遠洋マグロ漁船（第五福竜丸）の乗組員に急性放射線障害を発生させただけでなく、第五福竜丸を含む多

くの漁船の漁獲物等に放射性表面汚染を引き起こした。

本研究は、これら漁船の乗組員を対象に、当時の記録・資料等を収集・整理し、被ばく線量の評価が可能かどうかを調査することを目的とする。

背景

核爆弾の爆発による直接的損害は、爆風、熱線及び放射線によって引き起こされる。このうち放射線は、爆発時の核分裂及び核

融合反応に伴う即時の成分と爆発によって生成された核分裂生成物等に起因する残留成分とに分けることができ、放射性降下物（フォールアウト）による放射線は後者による。

放射性降下物は、爆発の高熱によって蒸発した核分裂生成物、未反応の核物質及び爆弾の構造材等が、上空の低温下において凝縮し、粒子状の塊となって地表に降下したものである。地表に至るまでのその経路等から、(a) 局地放射性降下物、(b) 対流圏放射性降下物、及び(c) 成層圏放射性降下物の三つに大きく分類される（UNSCEAR, 1962; Eisenbud and Gesell, 1997）。(a)の局地放射性降下物は、比較的大きな粒子からなり、爆発地点近くに概ね 24 時間以内に降下するものとして定義される。(b)は、対流圏に注入された比較的小さな粒子からなる。対流圏内の気流によってより遠方まで運ばれ、核爆発地点と同じ緯度帯に主に広がる。また、降雨等によって大気中から除去され、約一ヶ月で地表に沈降するとされる。(c)は、成層圏に注入された粒子からなり、年単位にもなる成層圏での長期の滞留と拡散を経て、より広域の地表に沈降する。ここで、(a)と(b)の区分は、事実上、放射性降下物が 24 時間以内に地表に到達するかどうか（又は到達する大きさの粒子かどうか）によるが、とりわけ短半減期かつ高放射能の放射性核種からなり、高線量被ばくをもたらす場合もある(a)の局地放射性降下物に留意すべき核爆発当日の時間帯（24 時間以内）と、翌日以降の比較的低線量率の時間帯とを明確に分けるといふ防護対策に係る経験に基づいたものでもある。そうした観点で、核爆発の翌日から数日間の放射性降

下物を二次（secondary）放射性降下物と呼称する場合もある（Heidt *et al.*, 1953）。また、(b)と(c)は、あわせて世界規模の放射性降下物（グローバルフォールアウト）と呼ばれる。

これらの分類の放射性降下物の相対的な割合は、核爆弾の爆発の威力（核出力）、爆発の高度及び爆発の周囲の環境によって変化する。UNSCEAR（1962）によれば、核出力 1 メガトン（Mt）以上の核爆弾に対して、(a)、(b)及び(c)の放射性降下物の相対割合の近似値は、陸上爆発で 79 : 1 : 20、水上爆発で 20 : 1 : 79、1 Mt 未満に対して、陸上爆発で 80 : 20 : 0、水上爆発で 20 : 80 : 0 である。陸上爆発の場合は、爆発時の上昇気流によって巻き上げられた土砂等と核分裂生成物等が結合するなどして大きな粒子が形成されやすいので相対的に多くの局地放射性降下物が生成される。一方、水上爆発の場合は、より小さな粒子だけが生成される。

局地放射性降下物は、風向及び風速などの条件によって、爆発による直接的損害（爆風、熱線及び爆発時の初期放射線）が及ばない距離にまで到達する場合がある。ビキニ水爆実験のうち昭和 29 年 3 月 1 日に実施されたブラボー実験は、この局地放射性降下物による被害の典型例である。ブラボー実験によって発生した放射性降下物は、米国が事前に設定した危険区域を越え、爆発地点から東方約 200 km にあるロンゲラップ環礁にまで飛来し、住民に急性放射線障害を引き起こした。ブラボー実験の当日、ロンゲラップ環礁の北側海域で操業していた遠洋マグロ漁船「第五福竜丸」の乗組員に対しても同様に甚大な被害を与えた。

昭和 29 年 3 月から 5 月にかけて合計 6 回実施された核実験の諸元（実施日時、実験名（コードネーム）及び核出力）を表 1 に示す。1～5 回目で使用された核爆弾は、高温による核融合反応（熱核反応）によって爆発力を高めた水素爆弾であり、ビキニ環礁で爆破された。6 回目の核爆弾は、ブースト型核分裂兵器に分類されるもの（核融合反応を部分的に利用しているものの核出力へのその寄与は水素爆弾に比べて小さい）であり、エニウエトク環礁で爆破された。ブラボー実験とクーン実験は環礁の陸地部分で、そのほかは礁湖内に投錨された艇（はしけ）上で実施された。

表 1 キャッスル作戦の核実験一覧

| | 実験日時 (現地時間) * | 実験名 (コードネーム) | 核出力 (Mt) ** |
|---|------------------|-----------------|----------------|
| 1 | 3 月 1 日 6:45 | ブラボー | 15 |
| 2 | 3 月 27 日 6:30 | ロメオ | 11 |
| 3 | 4 月 7 日 6:20 | クーン | 0.11 |
| 4 | 4 月 26 日 6:10 | ユニオン | 6.9 |
| 5 | 5 月 5 日 6:10 | ヤンキー | 13.5 |
| 6 | 5 月 14 日 6:20 | ネクター | 1.69 |

* 世界協定時間及び日本時間は、それぞれ -12 時間、-3 時間として換算する。

** TNT 換算。広島と長崎に投下された原子爆弾の核出力は、それぞれ 0.015 Mt、0.021 Mt である。

B. 研究方法

1. 文献調査

ビキニ水爆実験によって被災した漁船等について厚生労働省及び外務省が開示した資料並びに日米政府の関係公文書等を中心

に文献調査を行う。特に物理学的手段による線量復元に関する、次の項目について情報を整理する。

- (1) 核実験当時の現地での放射線モニタリング
- (2) マーシャル諸島住民の線量再構築作業
- (3) 漁船航路

2. 放射性降下物の分布とそれに基づく線量（率）の計算

1980 年代に米国で開発された放射性降下物分布予測コード及び広く利用されるガウスプルームモデルによる微粒子の大気拡散計算の考え方を利用して、マーシャル諸島近海におけるブラボー実験による放射性降下物の分布図を作成する。さらに、当該分布図と漁船の航路の重ね合わせから外部被ばくによる線量を推計する。

（倫理面への配慮）

本研究は、国立研究開発法人放射線医学総合研究所の倫理委員会において承認を受けた後に実施された。

得られた個人情報、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構個人情報保護規程 26（規程）第 54 号に従い、厳重に管理し、解析に際しては匿名化を行うなどして個人が決して特定されないように留意した。

C. 研究結果

1. 文献調査

- (1) 核実験当時の現地での放射線モニタリング

米国原子力委員会の Health and Safety Laboratory (HASL；現在、国土安全保障省 National Urban Security Technology

Laboratory)は、ビキニ水爆実験において、米軍が管轄する危険区域の外側の放射線モニタリングを担当し、その結果を報告した (Breslin and Cassidy, 1955)。

モニタリングは、ビキニ環礁から 2,200 km 内にある計 12 の島に設置した地上局の自動連続放射線モニタ (GM 計数管式検出器) と米海軍航空機に搭載した測定器 (シンチレーション式検出器) による。地上局のうち、ロンゲリック環礁、マジュロ環礁、クェゼリン環礁、ウジェラング環礁、ポナペ島 (現在のミクロネシア連邦ポンペイ島) 及びクサイ島 (同コスラエ島) のそれは、爆心地から約 250~900 km における照射線量率の連続的な記録と放射性降下物が飛来した時刻を与えた。また、マーシャル諸島のほとんどの環礁をカバーした航空機による観測結果は、減衰曲線 ($t^{-1.2}$ 、ここで t は核爆発からの経過時間(h)) を当てはめることによって観測の前後の時刻に外挿された。これら観測された線量率を、核実験と核実験の間のインターバルにわたって積分することによって、各環礁における外部被ばくによる線量 (屋外に滞在し続けた場合) が推定された。図 1 にマーシャル諸島の地図、表 2 にそれぞれの環礁について推定された線量を示す。なお、ここで線量の単位は照射線量(R)であり、1 R は、周辺線量当量で約 10 mSv、後述する換算手順に基づけば実効線量で 7.2 mSv に相当する。

アイリングナ[†]、ロンゲラップ[†]、ロンゲリック[†]、ピカール、ウチリック[†]、タカといったビキニ環礁の東側で、かつ、距離の近い環礁で線量が高い。これらのうち、無人島を除く 4 島 (†印) で、一回目のブラボー実験から数日の間に住民等の避難が行

われた。これらの島への放射性降下物の到来はいずれも爆発後 24 時間以内 (Steton *et al.*, 1956) であるので、典型的な局地放射性降下物によるものと言える。これは、ロンゲラップ環礁の北側海域で操業していた第五福竜丸も同様である。一方、爆発地点からより遠方の島については、距離が離れるにつれ線量が大きく下がる傾向が見て取れる。これらは、前述した分類に基づくと、いずれも対流圏放射性降下物によるものである。計 6 回の核実験による線量の内訳をみると、一回目のブラボー実験からの線量寄与が全体の多くを占める。

また、航空機によるモニタリングとは別に、HASL は、面積 1 平方フィートの粘着紙 (gummed paper) を用いる放射性降下物の観測を米国内外の関係機関の協力のもと全世界規模で実施した (Eisenbud, 1956)。地上から高さ 1 m に水平に置かれた粘着紙は、毎日交換され、灰化処理したのち GM 計数管による測定によって全 β 放射能として評価された。キャッスル作戦の際にも、マーシャル諸島近海 (表 2 に示したマジュロ環礁やクェゼリン環礁等の地上局) で観測が行われ、その結果は、US Weather Bureau (現在、国立気象局) の List (1955) 及び Machta *et al.* (1956) によって報告された。これらの報告は、対流圏放射性降下物が、貿易風によって爆発地点の西側に広がる成分と、対流圏上層の風によって東側に広がる成分とに大きく分けられることを示す。特に List の報告では、毎日の放射性降下物の広がり程度が、それぞれの観測地点における観測値とともに、100 dpm/ft² (1 平方フィート当たりの毎分崩壊数) に相当する等値線として図示されている。粘

着紙で記録された最大値は、マジュロで約 100 万 dpm/ft² (現地時刻 3 月 4 日 0:30~3 月 5 日 0:30、ここでは観測時刻の中間点に減衰補正した値) であるが、これは同日にマジュロで観測された線量率と照らし合わせると、約 1~2 mR/h (周辺線量当量率で約 10~20 μSv/h) (Breslin and Cassidy, 1955) に過ぎない。したがって、List の報告に示された放射能の等値線図は、爆心地近くの局地放射性降下物による線量寄与が支配的な地域を除き、対流圏放射性降下物による線量率が決して高くはなかったことを示す。

(2) マーシャル諸島住民の線量再構築作業
住民避難が行われたロンゲラップ環礁等の 4 環礁については、陸上での線量率の観測に基づく線量評価が行われた (Sondhaus and Bond, 1955; Lessard *et al.*, 1985)。最大線量は、ロンゲラップ環礁の約 200 R であり、前述した航空機モニタリングによる結果と大きく変わらない。

一方、住民避難が行われなかったアイルック環礁等を含むマーシャル諸島の全島について、線量率の直接観測に基づくこれまでの方法とは別の方法に基づく、線量再構築作業が近年進められている (NCI, 2004)。最新の報告 (Bouville *et al.*, 2010; Beck *et al.*, 2010; Simon *et al.*, 2010) によれば、任意の時刻における各島の線量率は、

$$X(t) = D \times C \times f(t) \quad \dots(1)式$$

X(t): 時刻 t における照射線量率(R/h)

D: ¹³⁷Cs 沈着密度(Bq/m²)

C: ¹³⁷Cs 沈着密度から、時刻 t= 12 (h) における全核種による寄与を含む線量率への換算係数(R/h per Bq/m²)

f(t): 減衰曲線 (ここでは f(t=12) = 1.0)

から計算される。ここで、¹³⁷Cs 沈着密度はそれぞれの島で観測された値に基づく。換算係数 C 及び関数 f(t)は、Hicks (1984) による計算値であり、¹³⁷Cs だけでなく短半減期核種による寄与も含まれる。(1)式を、放射性降下物の到着時間 (TOA: Time of Arrival) 以降に積分することによって線量 (R)を求めることができる。

代表的な環礁での ¹³⁷Cs 沈着密度と TOA をそれぞれ図 2、図 3 に示す (Beck *et al.*, 2010)。HASL による航空機モニタリングによる結果と同様に、ビキニ環礁の東側で、かつ、距離の近い幾つかの環礁で、10 kBq/m² を超える高い ¹³⁷Cs 沈着密度及び 24 時間以内の TOA として評価された。

これらの数値を用いて、ビキニ環礁の東側約 500 km にあるビカール環礁及びウチリック環礁について、(1)式から算出した線量率と航空機モニタリングによる線量率を比較した結果を図 4 に示す。この計算では、TOA と同じ時刻に全ての放射性降下物が地表に沈着し、かつ時間による減衰を表す関数 f(t)が t^{-1.2} で近似されると仮定した。計算及び観測による線量率カーブはよく合う。時間が経過するにつれ、計算値 > 観測値になるが、これは、観測値が風雨等の自然要因による減衰の影響を受けるためと考えられる。こうした影響を含まない計算値は、ある一定期間にわたる積算線量を計算する場合、むしろ保守的な結果を与えると考えられる。

(3) 漁船航路

厚生労働省及び外務省等から公開された漁船の航路 (経緯度で表された位置座標) 情報等に基づき、ブラボー実験の際にビキニ環礁の東側海域を航行し、放射性降下物

による何らかの影響を受けた、あるいはその恐れのある船（第十二高知丸、第五明神丸、第十三光栄丸、第七大丸、第十一高知丸、第二幸成丸、瑞洋丸、第十二宝幸丸、尾形海幸丸、及び第十宝成丸）についてその航路を地図上に転記したものを図 5 に示す。また、比較のため第五福竜丸の航路も示す。

このうち、第五福竜丸を除き、核実験の 24 時間以内にマーシャル諸島領海（北緯 15 度以南・東経 175 度以西）を航行した船は見当たらない。なお、図で東経 175 度以西の領域が、昭和 29 年 3 月 18 日に設定された水産庁指定要報告区域である。

2. 放射性降下物の分布とそれに基づく線量（率）の計算

“マーシャル諸島住民の線量再構築作業”での論考の通り、任意座標における ^{137}Cs 沈着密度と TOA が推定できれば、その座標における線量率の計算が可能であり、また、それを C.1.(3)で示した漁船の航路に沿って積分することで漁船毎に線量の算出が可能になると考えられる。ここでは、放射性降下物による線量が特に高いと考えられるブラボー実験について、上記方法の適用を試みた。

まず、ブラボー実験における放射性降下物の広がり傾向を調べるため、それぞれの環礁における ^{137}Cs 沈着密度を爆発地点からの方位の関数として整理したものを図 6 に示す。ここで、横軸は、方位（北を 0 度として時計回り）、縦軸は、 ^{137}Cs 沈着密度にその島までの距離を乗じた値である。ここで、距離及び方位の計算は、国土地理院の測量計算サイトを利用した。この図か

ら、放射性降下物は、東側に広がる成分（主に局地放射性降下物による）とそれ以外の方位に広がる成分（主に対流圏放射性降下物による）とに明確に分離することができ、特に後者の分布については、方位 50~270 度の範囲で沈着密度×距離が方位に依存せずにほぼ一定の値になることから、爆心地からの距離の逆数に比例する分布モデルによって近似的に表現できることが示唆された。そこで、前者の局地放射性降下物の分布については、1980 年代に米国で開発された局地放射性降下物分布予測コードの計算モデル、後者の対流圏放射性降下物の分布については、ガウスプルームモデルを用いることとした。

本研究で使用した局地放射性降下物分布の計算モデルは、Norment (1981) が開発した放射性降下物分布予測コード DNAF-1 のものである。このコードは、陸上での核実験で観測された粒径分布を持つ粒子の高高度からの水平投射を計算するものであり、様々な核出力（降下の始点になる高度が変わる）における粒子の地表沈着の割合が爆発後の経過時間の関数として解析的な表現（数式）でコードに組み込まれていることを特徴とする。計算に必要な情報は、核出力（0.1 kt~100 Mt）、単一の実効的な風速等である。DNAF-1 の計算結果は、任意の位置における単位面積当たりの放射性降下物の割合と、それに K ファクターと呼ばれる換算係数を乗じて得られる照射線量率 (R/h) であるが、ここでは前者の量に着目し、代表的な環礁におけるその量を、その島について評価された ^{137}Cs 沈着密度に規格化することで、局地放射性降下物が沈着した全域にわたる ^{137}Cs 沈着密度分布を得た。

規格化点は、ビカール環礁とアイルック環礁とし、それぞれの方位における風速は、距離と TOA からそれぞれ 8.3、5.6 m/s と算出した。

一方、対流圏放射性降下物の分布については、ガウスプルームモデルのうち、1,000 km を超える距離までその適用を拡大した UNSCEAR (2000) のモデル—適当な方位に分割した扇形内で放射性粒子の濃度が一様分布すると仮定—を利用した。このモデルでは、濃度は、扇形の弧長、すなわち中心からの距離に逆比例することになるので、図 6 から予想される対流圏放射性降下物の広がり結果的によく合う。計算では、全方位を 12 の扇形に均等に分割し、その扇形内に含まれる環礁の距離と TOA から算出した平均風速について大気安定度別に濃度の距離による変化（最終的には異なる大気安定度に対するその変化の算術平均）を求め、距離 500 km 以遠においてその濃度勾配を距離の冪乗で表すための冪指数（-1.1～-1.4）を算出した。図 6 から、距離 500 km における ^{137}Cs 沈着密度を方位に関係なく 300 Bq/m² とし、それを上記の冪演算で内外挿することによって、任意の距離と方位における ^{137}Cs 沈着密度分布を得た。なお、この方法の場合、0～50 度及び 270～360 度の方位で一桁程度 ^{137}Cs 沈着密度を高めに見積もる結果となる。

DNAF-1 モデルによって評価したビカール環礁方面及びアイルック環礁方面の放射性降下物による ^{137}Cs 沈着密度、ガウスプルームモデルによって評価した全方位についての放射性降下物による ^{137}Cs 沈着密度、及びそれらを単純に合計した ^{137}Cs 沈着密度を、Beck らによる ^{137}Cs 沈着密度評価値

と比較した結果を表 3 に示す。DNAF-1 モデル等に基づき評価した値は、爆心地に近い環礁（ロンゲラップ環礁等）でやや過小な値を示すものの、それ以外で、ファクター 2 程度で Beck らによる ^{137}Cs 沈着密度評価値に合う。これらのモデルを使用して、東経 157 度～西経 178 度及び北緯 1～20 度の範囲について経度緯度それぞれ 1 度メッシュで ^{137}Cs 沈着密度の分布図を作成した。この分布図を基に、(1)式を用いて計算した線量率を、等線量率線として表したものを図 7（DNAF-1 モデルの計算によるビカール環礁方面成分とアイルック環礁方面成分の合計）及び図 8（ガウスプルームモデルの計算による全方位一様成分）に示す。また、図 7 及び図 8 の線量率を、二回目の水爆実験前日の 3 月 26 日まで積分することによって得られた等線量線を、それぞれ図 9、図 10 に示す。なお、これら図中の線量及び線量率は、陸上相当での値である。

次に、 ^{137}Cs 沈着密度分布（とそれに基づく線量率）と図 5 に示した漁船航路の重ね合わせから線量を計算するプログラムを作成した。本プログラムは、以下に示す条件で線量を計算する。(i) 放射性降下物が到達するポイントに、漁船が TOA 以前から滞在していた場合、放射性降下物の全量が漁船上に沈着し、漁船の移動経路に関係なく、TOA から指定時刻まで(1)式を時間積分する。(ii) 放射性降下物が到達するポイントに、漁船が TOA 以降に進入してきた場合、その進入時刻における線量率の 1/300 を海上からの線量寄与として移動経路に沿って積分する。ここで、陸上相当の線量率から海上相当の線量率への変換は文献(Thomas *et al.*, 1991) による。

代表的な漁船（第十二高知丸及び第二幸成丸）について、 ^{137}Cs 沈着密度と TOA のヒートマップに、それぞれの航路を重ね合わせたものを図 11～12 に示す。航路とともに図中に示した数字は、爆発からの経過時間（マイナス符号は爆発までの時間）である。第十二高知丸（図 11）は、放射性降下物が落ちてきた時刻以前からその分布の南端近くで操業しており、その後、放射性降下物が既に落ちた後の海域を横切るように北西方向に航行した。また、第二幸成丸（図 12）は、放射性降下物が既に落ちた後の海域を通過した。

代表的漁船（10 隻）について、外部被ばくによる線量を推計した結果を表 4 に示す。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線量が最大（156 mR）となった。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（Glasstone and Dolan, 1977）に対する ICRP Publ. 74（ICRP, 1996）の回転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、 $0.156 \text{ (R)} \times 8.76 \text{ (mGy/R)} \times 0.817 \text{ (Sv/Gy)} = 1.12 \text{ mSv}$ となる。また、汚染した海域を通過しただけの漁船の線量は低い。

D. 考察

(1) ブラボー実験における代表的漁船の線量について

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漁船はない。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漁船の 2 パターンがあるのみで、これらの漁船の外部被ばくによる線量は最大でも 156 mR と推計された。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）の住民と同じ程度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、(i) 降雨等の影響、(ii) 漁船表面（甲板等）の有限面積による影響、(iii) 放射性降下物の降下期間の延長による影響が考えられる。(i)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、放射性降下物が漁船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。(ii)については、漁船表面（甲板等）の面積補正をすれば、線量は下がる。これは、(1)式で使用する換算係数が、地上の広い範囲に放射性降下物が一様に沈着した場合を前提にしたものであるためである。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）は下がることとなる。また、(iii)についてであるが、今回の推計では、放射性降下物が TOA と同じ時刻にその全量が沈着すると仮定した。この仮定は、漁船が移動しない場合であれば、漁船上に落ちた放射性降下物による線量率の積分期間をむしろ長くとる計算になるので保守的な線量推計をもたらす。これに対して、放射性降下物の降下が、TOA からある期間にわたって継続し、かつ移動中の漁船の航路がその期間と部分的に重なる場合、その重なりによって放射性降下物の漁船への沈着量及びそれによる線量に増減が生じる可能性がある。ただし、長く継続

した降下期間は、放射性降下物の単位時間当たりの沈着密度を減じることになるので、大幅な増減の要因になるとは考えにくい。

(2) 内部被ばく線量について

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が Simon *et al.* (2010) によって推計されている。ここでは、外部被ばくによる線量が、漁船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。Simon 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、これに対して甲状腺線量は 5.4 mGy である。また、甲状腺以外の赤色骨髄、胃壁、及び結腸の線量はいずれも外部被ばく線量を超えるものではなく、また、このことは、長半減期核種の摂取による慢性的な線量寄与の増分を加えても同様である。このため、漁船乗組員の内部被ばくによる線量は、マジュロ環礁の住民等と同様に、外部被ばくによる線量よりも低いと考えられる。

E. 結論

昭和 29 年 3 月から 5 月にかけて行われたビキニ水爆実験によって被災した漁船の乗組員について、当時の記録・資料等を収集・整理し、それをもとに外部被ばくによる線量を推計した。

(1) ビキニ水爆実験当時に、米国によって行われた放射線モニタリング（線量率及び放射性降下物沈着密度）の結果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、核種組成等の情報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、当時近海を航行していた漁船等の乗組員の外部被ばくに

よる線量の推定に利用できると考えられる。

(2) 1980 年代に米国で開発された放射性降下物分布計算コード等の考え方を利用して、ブラボー実験における放射性降下物の分布図を作成した。さらに、当該分布図と漁船の航路の重ね合わせから外部被ばくによる線量を推計するプログラムを作成した。当該プログラムを利用して代表的漁船（近海で操業していた 10 隻、第五福竜丸を除く）について、外部被ばくによる線量を計算した。これら 10 隻の漁船は、ビキニ環礁の東側に主として広がる放射性降下物が降下する領域の端で漁労活動を行っていたか、放射性降下物がほぼ降下し終わった後にその海域を通過したかのいずれかであり、外部被ばくによる線量は最大で 156 mR (1.12 mSv 相当) と推計された。

F. 健康危険情報

該当無し

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. 追補

Beck, H. L., Bouville, A., Moroz, B. E., Simon, S. L., 2010. Fallout Deposition in the Marshall Islands from Bikini and Enewetak Nuclear Weapons Tests. *Health Phys.* 99(2), 124–142.
Bouville, A., Beck, H. L., Simon, S. L., 2010. Doses from External Irradiation

- to Marshall Islanders from Bikini and Enewetak Nuclear Weapons Tests. *Health Phys.* **99**(2), 143–156
- Breslin, A. J., Cassidy, M. E., 1955. Radioactive Debris from Operation Castle, Islands of the Mid-pacific. NYO-4623, US Atomic Energy Commission.
- Eisenbud, M., 1956. The AEC Fallout Monitoring Network. *J. Air Pollut. Control Assoc.* **6**(3), 144–146.
- Eisenbud, M., Gesell, T. F., 1997. Environmental Radioactivity from Natural, Industrial and Military Sources: From Natural, Industrial and Military Sources. Academic press.
- Glasstone G., Dolan, P. J., 1977. The Effects of Nuclear Weapons, Third Edition. US Government Printing Office.
- Heidt Jr, W. B., Schuert, E. A., Perkins, W. W., Stetson, R. L., 1953. Nature, Intensity, and Distribution of Fallout from MIKE Shot. WT-615, US Naval Radiological Defense Laboratory.
- Hicks, H. G., 1984. Results of Calculations of External Gamma radiation Exposure rates from Local Fallout and the Related Radionuclide Compositions of Selected U. S. pacific Events. UCRL-53505, Lawrence Livermore National Laboratory.
- ICRP, 1996. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation. ICRP Publication 74, *Ann. ICRP* **26**(3/4).
- Kumatori, T., Ishihara, T., Hirashima, K., Sugiyama, H., Ishii, S., Miyoshi, K., 1980. Follow-up Studies over a 25-year Period on the Japanese Fishermen Exposed to Radioactive Fallout in 1954. *The medical basis for radiation accident preparedness*, Elsevier North Holland, 33–54,
- Lessard, E. T., Miltenberger, R. P., Conrad, R. A., Musoline, S. V., Naidu, J. R., Moorthy, A., Schopfer, C. J., 1985. Thyroid Absorbed Dose for People at Rongelap, Utirik, and Sifo on March, 1954. BNL-51882, Brookhaven National Laboratory.
- List, R. J., 1955. World-Wide Fallout From Operation Castle. NYO-4645(EX), US Atomic Energy Commission.
- Machta, L., List, R. J., Hubert, L. F., 1956. World-Wide Travel of Atomic Debris. *Science*, **124**, 474–477.
- NCI, 2004. Estimation of the Baseline Number of Cancers Among Marshallese and the Number of Cancers Attributable to Exposure to Fallout from Nuclear Weapons Testing Conducted in the Marshall Islands. National Cancer Institute.
- Norment, H. G., 1981. DNAF-1: An Analytical Fallout Prediction Model and Code. DNA 6168F, Defense Nuclear Agency.
- Simon, S. L., Bouville, A., Melo, D., Beck, H. L., Weinstock, R. M., 2010. Acute and Chronic Intakes of Fallout Radionuclides by Marshallese from

- Nuclear Weapons Testing at Bikini and Enewetak and Related Internal Radiation Doses. *Health Phys.* 99(2), 157–200.
- Steton, R. L., Schuert, E. A., Perkins, W. W., Shirakawa, T. H., Chan, H. K., 1956. Distribution and Intensity of Fallout. WT-915, U.S. Naval Radiological Defense Laboratory.
- Sondhaus, C. A., Bond, V. P., 1955. Physical Factors and Dosimetry in the Marshall Island Radiation Exposures. WT-939, US Naval Radiological Defense Laboratory.
- Thomas, C., Goetz, J., Klemm, J., Ortlieb, E., 1991. Analysis of Radiation Exposure for Naval Personnel at Operation Castle—Supplemental Report. DNA-TR-89-256, Defense Nuclear Agency.
- UNSCEAR, 1962. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Annex F: Environmental Contamination. United Nations.
- UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume I: Sources, Annex A: Dose assessment methodologies. United Nations.
- なお、距離及び方位の計算は、以下の国土地理院の測量計算サイトを利用した。
<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2stf.html>

表2 各環礁における外部被ばくによる線量(単位:mR)(Breslin and Cassidy, 1955)

| モニタリング方法 | 環礁・島嶼名 | 実験名 | ブラボー | ロメオ | クーン | ユニオン | ヤンキー | ネクター |
|----------|------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| | | 線量積分区間 (実験間の日数) | 3/1-3/26 (26) | 3/27-4/6 (11) | 4/7-4/25 (19) | 4/26-5/4 (9) | 5/5-5/13 (9) | 5/14-5/23 (10) |
| 航空機 | ラエー環礁 | Lae | 5.5 | 12 | 12 | 7.5 | 78 | 9.5 |
| | ウジャエ環礁 | Ujae | 6 | 32 | 17 | 9.5 | 48 | 1.4 |
| | オトー環礁 | Wotho | 250 | 270 | 110 | 55 | 95 | 4 |
| | アイリングナ環礁 | Alinginae | 60,000 | 3,400 | 3,300 | 8 | 600 | 70 |
| | ロンゲラップ環礁 | Rongelap | 180,000 | 11,000 | 6,000 | 3,400 | 1,700 | 300 |
| | ロンゲリック環礁 | Rongerik | 190,000 | 9,000 | 5,000 | 550 | 1,400 | 280 |
| | タオンギ環礁 | Taongi | 280 | 60 | 9.5 | 10 | 10 | |
| | ピカール環礁 | Bikar | 60,000 | 3,000 | 1,200 | 650 | 1,700 | 150 |
| | ウチリック環礁 | Utirik | 22,000 | 1,200 | 700 | 100 | 330 | 50 |
| | タカ環礁 | Taka | 15,000 | 800 | 1,000 | 120 | 380 | 50 |
| | アイルック環礁 | Ailuk | 5,000 | 410 | 110 | 100 | 500 | 20 |
| | ジェモ島 | Jemo | 1,200 | 410 | 130 | 18 | 200 | 20 |
| | リキエップ環礁 | Likiep | 1,700 | 170 | 80 | 30 | 200 | 16 |
| | ナムー環礁 | Namu | 1.8 | 90 | 100 | 0 | 25 | 0 |
| | アイリングラップ環礁 | Ailinglapalap | 7.2 | 140 | 100 | 8 | 0 | 0 |
| | ナモリック環礁 | Namorik | 20 | 160 | 70 | 2 | 0 | 0 |
| | エボン環礁 | Ebon | 20 | 250 | 50 | 8 | 25 | 0 |
| | キリ島 | Kili | 20 | 200 | 70 | 0 | 0 | 1.3 |
| | ジャルート環礁 | Jaluit | 20 | 300 | 70 | 8 | 0 | 2.6 |
| | ミリ環礁 | Mili | 60 | 160 | 200 | 20 | 0 | 1.3 |
| | アルノ環礁 | Arno | 60 | 200 | 300 | 8 | 25 | 1.3 |
| | マジュロ環礁 | Majuro | 200 | 200 | 50 | 20 | 0 | 1.3 |
| | オール環礁 | Aur | 40 | 200 | 50 | 8 | 40 | 2.6 |
| | マロエラップ環礁 | Malgolap | 350 | 120 | 50 | 0 | 25 | 4.0 |
| エリカブ環礁 | Erikub | 390 | 200 | 50 | 0 | 0 | 6.5 | |
| ウオツジェ環礁 | Wotje | 1,800 | 300 | 200 | 13 | 220 | 10 | |
| 地上局 | クエゼリン環礁 | Kwajalein | 150 | 480 | 250 | 12 | 320 | 17 |
| | マジュロ環礁 | Majuro | 156 | 137 | 53 | 2 | 2 | 0.7 |
| | クサイ島 | Kusaie | 85 | 4.2 | 0.7 | 0.2 | 0.5 | 0.1 |
| | ポナベ島 | Ponape | 5.5 | 20 | 31 | 21 | 38 | 6.2 |
| | トラック諸島 | Truk | 29.1 | 1.3 | 2.3 | 0.9 | 15.1 | |
| | ヤップ島 | Yap | | | | 8.7 | 4.7 | 4.6 |
| | イオージマ | Iwo Jima | | | | 6.8 | 12.7 | 2.0 |
| | ウジェラング環礁 | Ujelang | 85.4 | | 176 | 52 | 142 | |
| | ウェーク島 | Wake | 3.3 | 1.9 | 3.0 | 2.2 | 1.2 | 0.7 |
| | ジョンストン島 | Johnston | 110 | 28 | 66 | | | |

表3 DNAF-1モデル及びガウスプルームモデルで計算したマーシャル諸島及び近海の環礁・島嶼の¹³⁷Cs沈着密度

| 環礁・島嶼名 | 方位 (度) | 測地 線長 (km) | ¹³⁷ Cs沈着密度 (Beck, 他) D (Bq/m ²) | DNAF-1モデルで計 算したビカル環 礁方面の成分 | | DNAF-1モデルで計 算したアイルック環 礁方面の成分 | | ガウスプルームモ デルで計算した全 方位一様成分 | | 合計 | |
|-------------|-----------|------------------|--|----------------------------------|---------|------------------------------------|---------|--------------------------------|---------|----------------------------------|-----------------|
| | | | | D1 (Bq/m ²) | D1 D | D2 (Bq/m ²) | D2 D | D3 (Bq/m ²) | D3 D | D1+D2+D3 (Bq/m ²) | (D1+D2+D3) D |
| ウェーク島 | 10.0 | 854 | 20 | | | | | 160 | 7.9 | 160 | 7.9 |
| ミッドウェー島 | 42.0 | 2,571 | 5 | | | | | 39 | 7.9 | 39 | 7.9 |
| タオング環礁 | 50.4 | 517 | 410 | | | | | 290 | 0.7 | 290 | 0.7 |
| フレンチ・フリゲート瀬 | 62.3 | 3,302 | 2 | | | | | 29 | 14.4 | 29 | 14.4 |
| リフエ | 68.4 | 3,925 | 4 | | | | | 23 | 5.8 | 23 | 5.8 |
| ホノルル | 70.0 | 4,069 | 10 | | | | | 22 | 2.2 | 22 | 2.2 |
| ヒロ | 73.1 | 4,330 | 10 | | | | | 21 | 2.1 | 21 | 2.1 |
| ジョンストン島 | 75.4 | 2,775 | 50 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 36 | 0.7 | 36 | 0.7 |
| ビカル環礁 | 83.0 | 529 | 48,000 | 48,000 | 1.0 | 20 | 0.0 | 280 | 0.0 | 48,000 | 1.0 |
| ウチリック環礁 | 95.1 | 494 | 21,000 | 22,000 | 1.1 | 1,500 | 0.1 | 300 | 0.0 | 24,000 | 1.2 |
| タカ環礁 | 96.8 | 478 | 13,000 | 16,000 | 1.2 | 2,200 | 0.2 | 310 | 0.0 | 18,000 | 1.4 |
| ロンゲラップ環礁北 | 98.4 | 172 | 480,000 | 120,000 | 0.2 | 14,000 | 0.0 | 940 | 0.0 | 130,000 | 0.3 |
| ロンゲリック環礁 | 99.4 | 241 | 67,000 | 53,000 | 0.8 | 9,900 | 0.1 | 660 | 0.0 | 64,000 | 0.9 |
| メジット島 | 103.8 | 631 | 2,800 | 200 | 0.1 | 2,200 | 0.8 | 230 | 0.1 | 2,600 | 0.9 |
| アイルック環礁 | 106.1 | 531 | 3,700 | 160 | 0.0 | 3,700 | 1.0 | 280 | 0.1 | 4,100 | 1.1 |
| ロンゲラップ環礁南 | 108.9 | 180 | 100,000 | 28,000 | 0.3 | 16,000 | 0.2 | 930 | 0.0 | 45,000 | 0.4 |
| ジェモ島 | 110.7 | 498 | 2,600 | 13 | 0.0 | 3,500 | 1.4 | 300 | 0.1 | 3,800 | 1.5 |
| リキエップ環礁 | 114.9 | 466 | 2,900 | 1 | 0.0 | 2,500 | 0.9 | 320 | 0.1 | 2,800 | 1.0 |
| ウォッジェ環礁 | 115.2 | 576 | 2,600 | 0 | 0.0 | 1,300 | 0.5 | 260 | 0.1 | 1,500 | 0.6 |
| アイリンギナ環礁 | 116.2 | 138 | 32,000 | 27,000 | 0.9 | 17,000 | 0.5 | 1,200 | 0.0 | 46,000 | 1.4 |
| マロエラップ環礁 | 116.7 | 713 | 850 | 0 | 0.0 | 390 | 0.5 | 200 | 0.2 | 590 | 0.7 |
| エリカブ環礁 | 118.1 | 591 | 780 | 0 | 0.0 | 610 | 0.8 | 250 | 0.3 | 860 | 1.1 |
| オール環礁 | 120.3 | 744 | 560 | 0 | 0.0 | 100 | 0.2 | 190 | 0.3 | 300 | 0.5 |
| カントン島 | 120.8 | 3,016 | 100 | | | | | 41 | 0.4 | 41 | 0.4 |
| アルノ環礁 | 125.3 | 871 | 370 | | | 4 | 0.0 | 160 | 0.4 | 160 | 0.4 |
| マジュロ | 128.0 | 820 | 370 | | | 1 | 0.0 | 170 | 0.5 | 170 | 0.5 |
| ミリ環礁 | 129.6 | 955 | 330 | | | | | 140 | 0.4 | 140 | 0.4 |
| ノックス環礁 | 129.7 | 991 | 280 | | | | | 140 | 0.5 | 140 | 0.5 |
| ケゼリン環礁北 | 136.2 | 351 | 370 | | | 14 | 0.0 | 450 | 1.2 | 460 | 1.2 |
| ジャボット島 | 136.7 | 596 | 180 | | | | | 250 | 1.4 | 250 | 1.4 |
| アイリングラップ環礁 | 140.3 | 599 | 190 | | | | | 240 | 1.3 | 240 | 1.3 |
| ケゼリン環礁南 | 140.5 | 426 | 190 | | | | | 360 | 1.9 | 360 | 1.9 |
| ナムー環礁 | 142.0 | 519 | 150 | | | | | 290 | 1.9 | 290 | 1.9 |
| ジャルート環礁 | 142.8 | 799 | 190 | | | | | 180 | 0.9 | 180 | 0.9 |
| キリ島 | 147.4 | 792 | 190 | | | | | 170 | 0.9 | 170 | 0.9 |
| リブ島 | 148.2 | 440 | 150 | | | | | 350 | 2.3 | 350 | 2.3 |
| エボン環礁 | 153.8 | 868 | 150 | | | | | 150 | 1.0 | 150 | 1.0 |
| ナモリック環礁 | 154.8 | 742 | 150 | | | | | 180 | 1.2 | 180 | 1.2 |
| オトー環礁 | 156.3 | 193 | 480 | | | | | 980 | 2.0 | 980 | 2.0 |
| ラーエ環礁 | 160.9 | 323 | 260 | | | | | 520 | 2.0 | 520 | 2.0 |
| ウジャエ環礁 | 172.3 | 294 | 190 | | | | | 420 | 2.2 | 420 | 2.2 |
| クサイ島 | 199.9 | 749 | 200 | | | | | 170 | 0.9 | 170 | 0.9 |
| ポナベ島 | 235.9 | 942 | 100 | | | | | 140 | 1.4 | 140 | 1.4 |
| ウジェラング環礁 | 247.0 | 521 | 260 | | | | | 290 | 1.1 | 290 | 1.1 |
| トラック諸島 | 253.0 | 1,555 | 60 | | | | | 89 | 1.5 | 89 | 1.5 |
| コロール島 | 264.7 | 3,413 | 40 | | | | | 38 | 1.0 | 38 | 1.0 |
| エニウエトク環礁 | 266.4 | 322 | 450 | | | | | 480 | 1.1 | 480 | 1.1 |
| ヤップ島 | 268.0 | 2,980 | 40 | | | | | 44 | 1.1 | 44 | 1.1 |
| グアム | 277.0 | 2,235 | 20 | | | | | 60 | 3.0 | 60 | 3.0 |
| イオージマ | 303.0 | 2,909 | 5 | | | | | 26 | 5.3 | 26 | 5.3 |

表4 代表的漁船の外部被ばくによる線量推計結果

| 船名 | 積分期間 | 合計 (mR) | DNAF-1モデルで計算したビカルル環礁方面の成分 | | DNAF-1モデルで計算したアイルック環礁方面の成分 | | ガウスプルームモデルで計算した全方位一様成分 | |
|--------|----------|------------|---------------------------|--------|----------------------------|--------|------------------------|--------|
| | | | 船上(mR) | 海上(mR) | 船上(mR) | 海上(mR) | 船上(mR) | 海上(mR) |
| 第十二高知丸 | 3/1~3/26 | 156 | 90 | 1.3 | 2.0 | 0.0 | 62 | 0.1 |
| 第五明神丸 | 3/1~3/26 | 156 | 90 | 1.5 | 2.0 | 0.0 | 62 | 0.2 |
| 第十三光荣丸 | 3/1~3/26 | 100 | 50 | 1.2 | 0.0 | 0.0 | 49 | 0.2 |
| 第七大丸 | 3/1~3/26 | 99 | 50 | 1.3 | 0.2 | 0.0 | 48 | 0.2 |
| 第十一高知丸 | 3/1~3/26 | 2.5 | 0.0 | 2.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 |
| 第二幸成丸 | 3/1~3/26 | 2.4 | 0.0 | 2.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 |
| 瑞洋丸 | 3/1~3/26 | 2.4 | 0.0 | 2.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 |
| 第十二宝幸丸 | 3/1~3/26 | 0.6 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |
| 尾形海幸丸 | 3/1~3/26 | 89 | 0.0 | 2.6 | 0.0 | 0.4 | 86 | 0.3 |
| 第十宝成丸 | 3/1~3/26 | 8.7 | 0.0 | 8.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 |

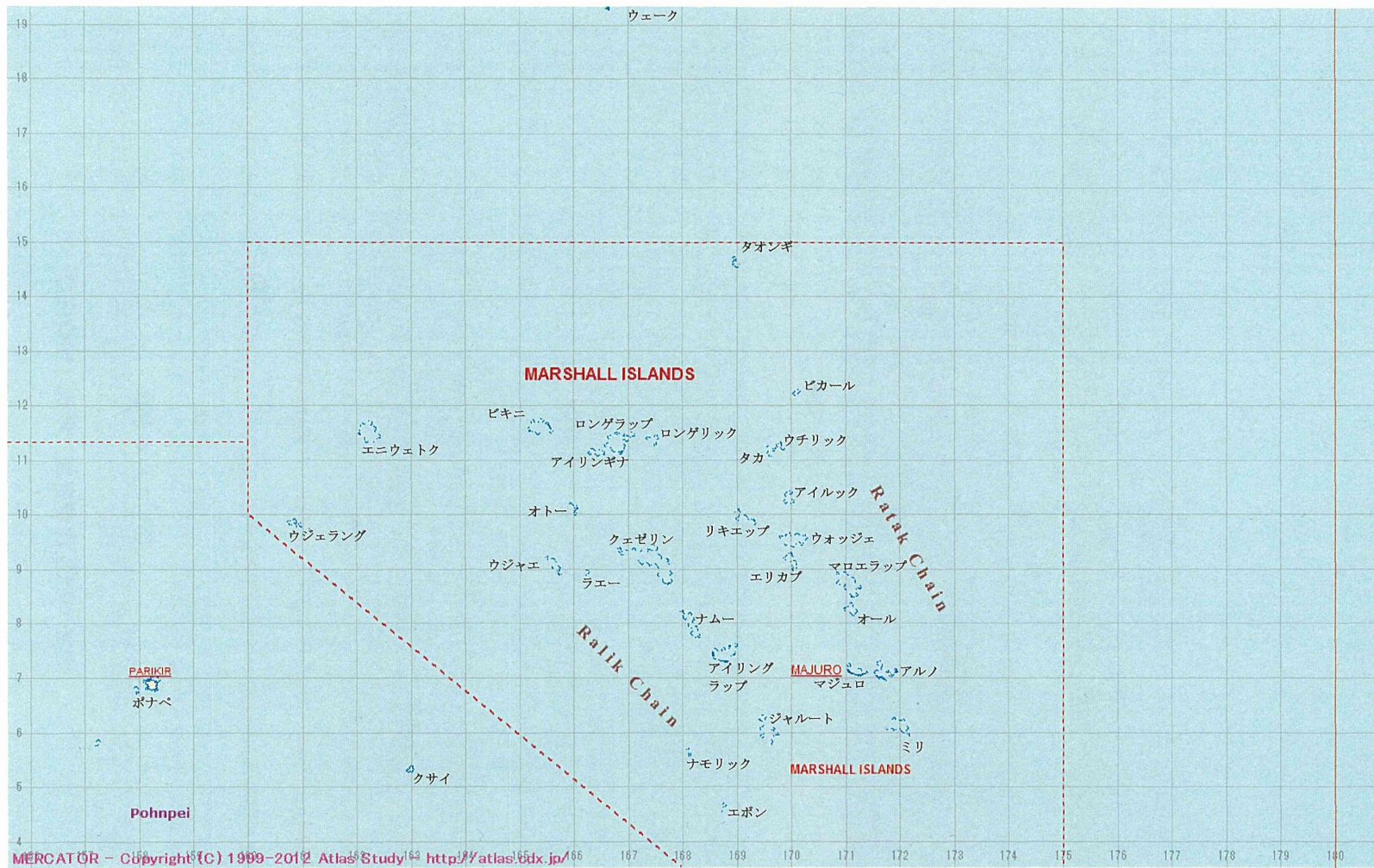
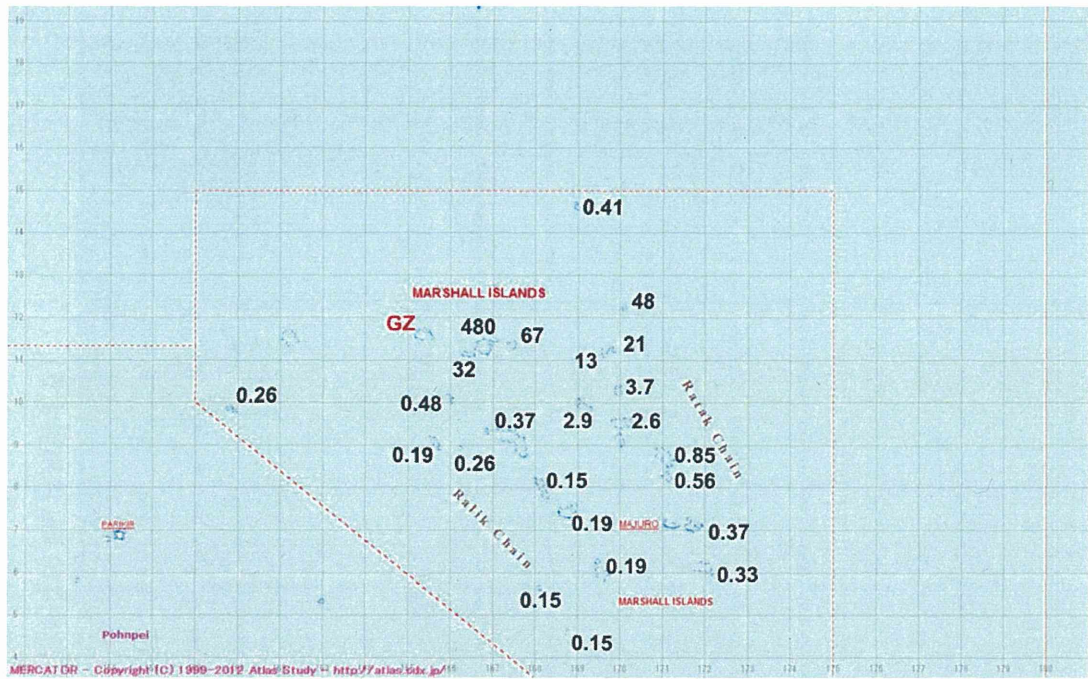
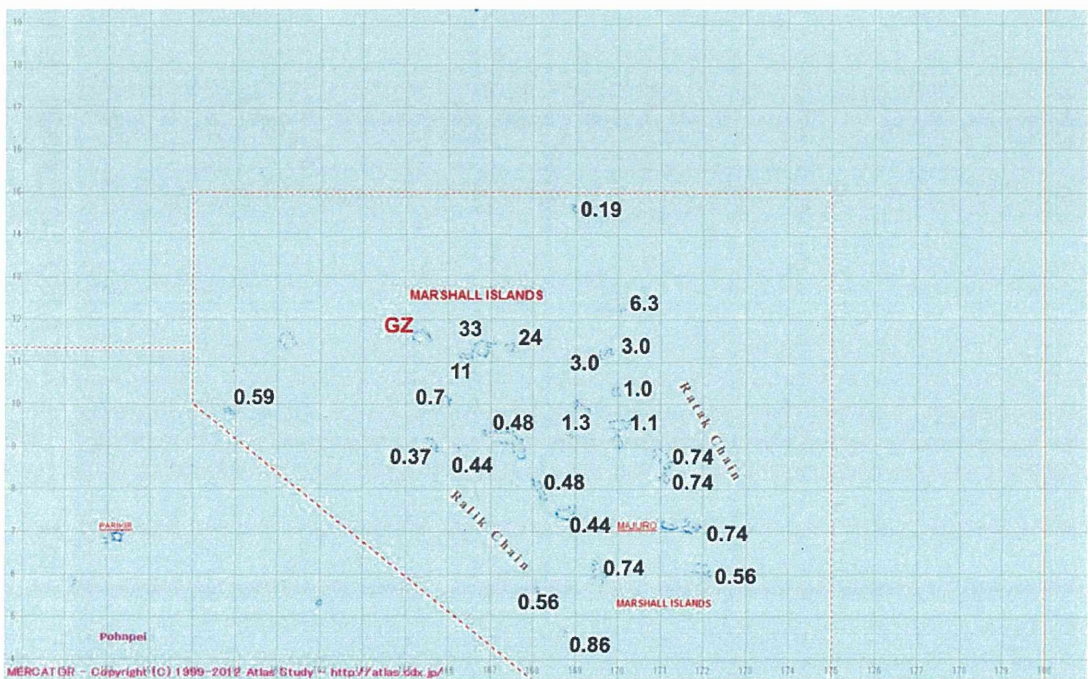


図1 マーシャル諸島及びその近海地図（経緯度線の間隔は約 110 km に相当する）

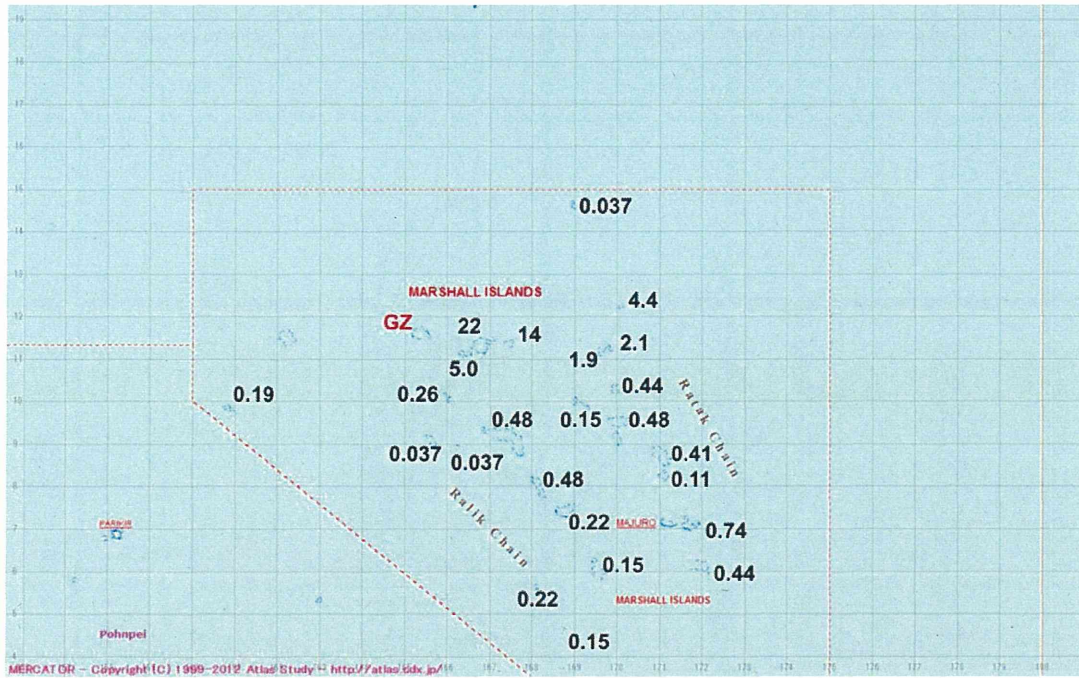


(a) ブラボー実験

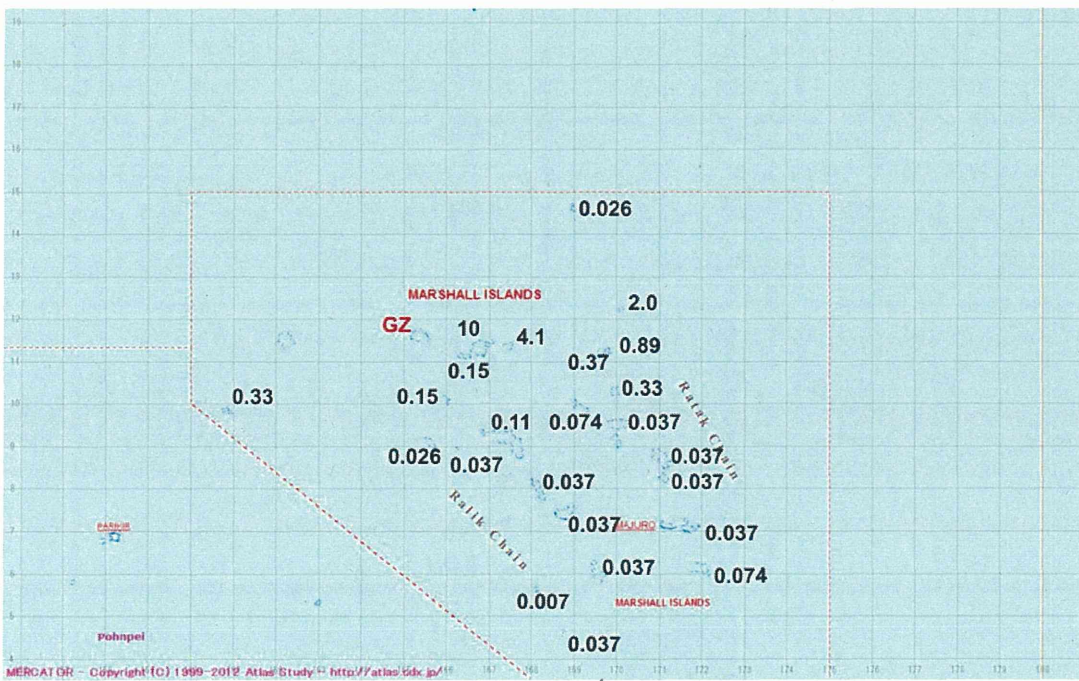


(b) ロメオ実験

図2 ^{137}Cs 沈着密度 (単位: kBq/m^2)

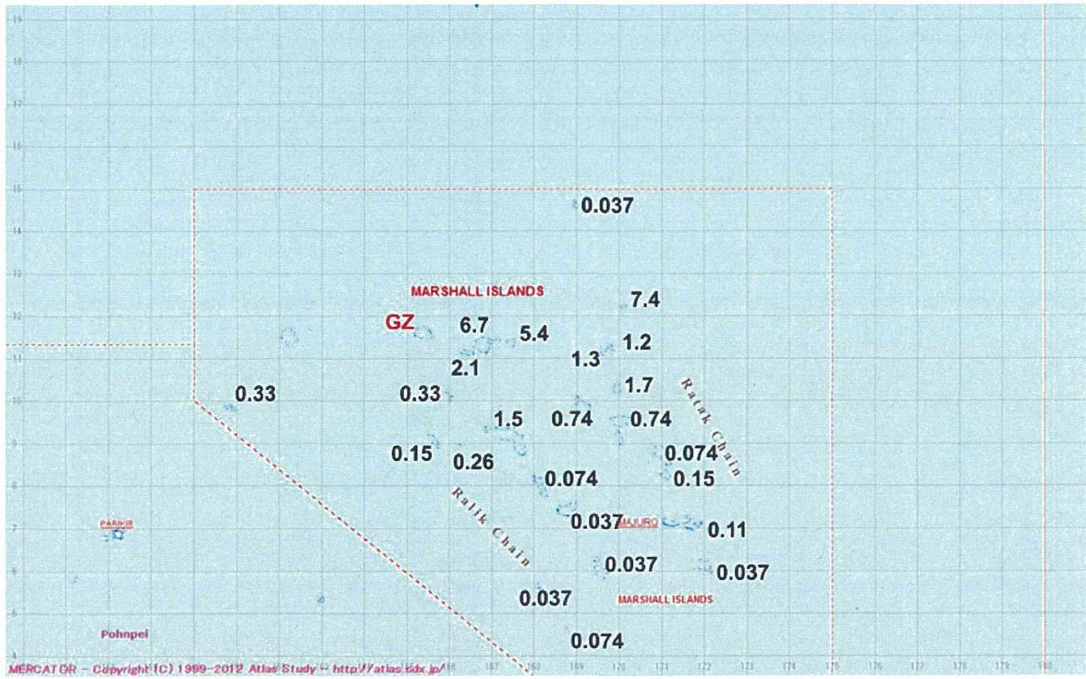


(c) クーン実験

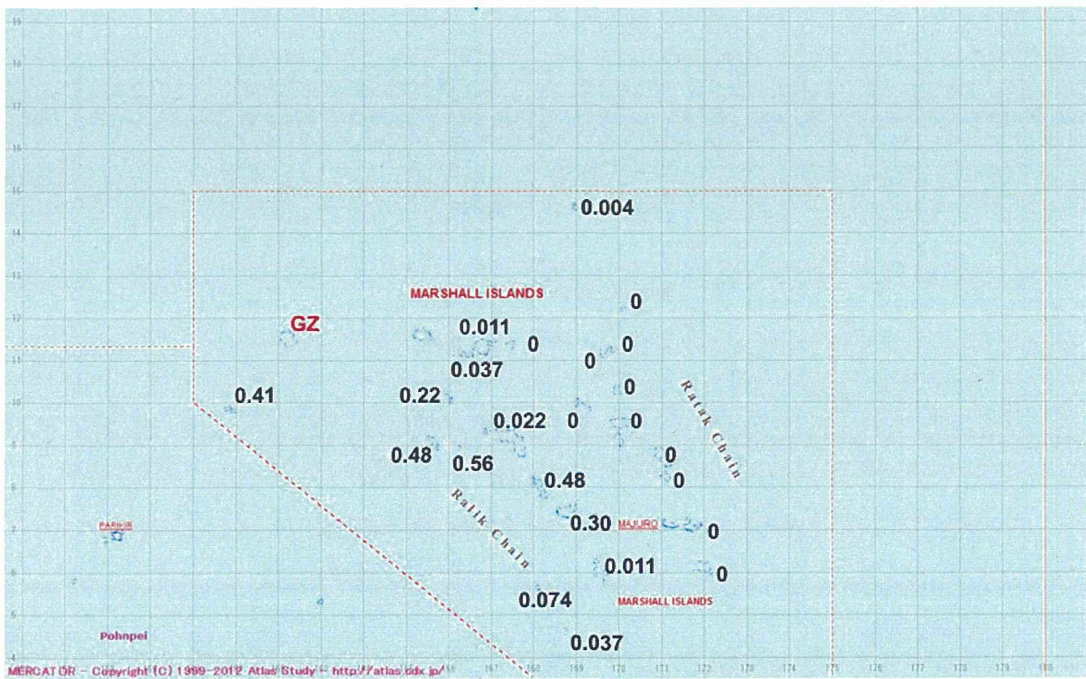


(d) ユニオン実験

図 2 (続き)



(e) ヤンキー実験



(f) ネクター実験

図 2 (続き)