

平成12年度
厚生科学研究費補助金特別研究事業

DS86の見直し及びDS01の基礎的モデル形成に係る研究

研究報告書

平成13年3月

DS86の見直し及びDS01の基礎的モデル形成に係る研究班

主任研究者 長 瀧 重 信

DS86の見直し及びDS01の基礎的モデル形成に係る研究

主任研究者 長瀧 重信（放射線影響研究所理事長）

研究要旨

原爆放射線による健康後影響の評価のためには、個々の被爆者の被曝線量を推定する必要がある。そのための原爆被曝放射線量評価体系として、現在、DS86（1986年線量体系）が使用されている。DS86は、基本的には今日の科学的知見からみて最良のものであるものの、広島の中性子に関する計算値と測定値の不一致の問題を中心に不確定性が存在する。DS86の発表後14年の間に、計算能力および測定技術は大きく向上し、問題を解決することが可能になってきた。そこで、線量再評価実務研究班を設置し、このDS86に関する不確定性を解消し、新しい原爆線量評価体系を作成するための活動を行っている。研究成果は、2000年3月に広島で開催された日米合同会議においても検討された。再度の日米合同会議を経て、2002年の前半には新しい線量体系（DS86の改訂版）を完成させる予定である。

分担研究者

葉佐井 博巳（広島国際学院大学工学部長）
星 正治（広島大学原爆放射能医学研究所国際放射線情報センター教授）
静間 清（広島大学工学部共通講座応用原子核教授）
小佐古 敏荘（東京大学原子力研究総合センター助教授）
柴田 徳思（高エネルギー加速器研究機構放射線科学センター長）
丸山 隆司（財団法人放射線影響協会企画部長）
平良 専純（財団法人放射線影響研究所常務理事）
藤田 正一郎（財団法人放射線影響研究所統計部副部長）

A. 研究目的

原爆放射線による健康後影響の評価のためには、個々の被爆者の被曝線量を推定する必要がある。この線量推定の計算を行うために、現在、DS86（1986年線量体系）という原爆被曝放射線量評価体系が使用されている。この体系は、現時点においても、放射線による被曝線量の決定とその健康後影響を検討する上

で、世界的に評価され信頼に足るものとされている。このDS86について、特に広島の中性子に関する計算値と測定値の不一致を中心とする不確定性が存在する。本研究は、この問題を解消するための研究を、測定と計算の両面から行い、新しい原爆線量評価体系を作成する基礎とすることを目的とする。

B. 研究方法

DS86は、核物理学の理論に基づく空気中カーマ、遮蔽カーマ、臓器線量の計算モデルを統合した線量計算方法に、被爆者の遮蔽データを入力として被爆者の被曝線量を計算するコンピュータ・システムである。この計算値の妥当性は、実際に広島・長崎で被曝した物理学的な試料（瓦、タイル、岩石、鉄、コンクリート、硫黄、など）の中での残留放射能の測定値対応する計算値との比較により検討された。現在提起されている広島の中性子に関する計算値と測定値の不一致の問題を解決するために、日米の物理学者により、日本側は主として測定、米国側は計算を中心にしてDS86に関するすべての要因について再検討を行ってきた。

本研究では、測定面では、中性子に係わる被曝試料の測定（コバルト-60、ユーロピウム-152）、速中性子に係わる被曝銅試料の測定（ニッケル-63）、ガンマ線に関する測定などを行い、計算面では、新線量評価体系の基礎となるモデルの構築、家屋等による遮蔽に関する研究などを行う。更に、日米の線量実務研究者による合同会議を開催し、研究成果の検討と共に、具体的な問題解決方法を討議する。その際、改定線量体系の作成のための日米の研究分担や予定表についても具体的な合意を行う。

C. 結果と考察

1) 原原爆被爆者の被曝線量再評価に関する総括（担当：葉佐井博巳）

広島原子爆弾から放出された中性子の線量が、DS86で計算された値と実測値とのずれは様々な測定が示すように明らかになった。長崎を含めて米国にソースや輸送計算の見直しが期待される。我々は今後NI-63の測定を行い精度を上げると同時にデータの相互比較を行うことが必要である。項目別に要約する。

(1) 爆弾のソース

a) 爆発モデルの提案：爆弾のソースについては米国側の問題で我々は直接知ることは出来

ない。そこで測定値に合わせるために爆発モデルを仮想し、もし爆発過程でクラックが出来、又高度の変更が可能なら解決できると提案した。これに対し米国側の何らかの反応を期待している。

b) 長崎の被曝資料測定：爆心から約1.6 km 地点のEu-152の測定を行ったが、その際スペクトルの中に自然放射能のバックグラウンドが含まれていて、測定値に余分の誤差が生じている可能性があり、さらに追求する必要を認めた。

(2) 送計算のための測定

a) 中性子による反応断面積の測：反応断面積を実験で求めた結果今までより小さい値が出た。しかし線源の強度が0.01Bq以上なら測定可能と判断される。

b) 低バック装置による測定：Cf-252を用いて予備実験を行い、その後広島日本銀行の被曝試料（爆心より382m、避雷針の電線）のNi-63を測定した。結果はDS86で計算した値より、測定値の方が約25%高かった。

(3) バックグラウンド

環境中性子について検討した結果、遠方では影響がある可能性はあるが、それよりも岩石に含まれる自然放射能の影響の方が大きいと判断された。

2) 長崎の原爆残留放射能⁶⁰Coおよび¹⁵²Euの測定とDS86中性子に基づく放射化計算値との比較（担当：静間 清）

コバルト濃縮試料、ユーロピウム濃縮試料ともにポリプロピレン製試験管に入れ、低バックグラウンド井戸型Ge検出器で測定した。長崎の⁶⁰Co、¹⁵²Euについての測定結果と計算値との比較を行なった結果、長崎においても広島と同様のずれが見られる。このことは広島原爆に特有の問題のみでなく、中性子の空気中輸送計算にもずれのあることを示唆している。長崎について、測定データが一致しているとはまだ結論できないので、さらに測定精度のよい方法で長崎についてのデータを加える必要がある。

3) 速中性子反応で生成される放射能測定による速中性子線の評価 (柴田徳思)

原爆速中性子で照射された試料中の放射能測定により、速中性子線の評価を行うために、速中性子で照射された銅試料中に、 $^{63}\text{Cu}(n,p)^{63}\text{Ni}$ 反応により生成される ^{63}Ni を測定して速中性子束の評価をする方法を提案した。(1) $^{63}\text{Cu}(n,p)^{63}\text{Ni}$ 反応の断面積測定については、1.8MeV から 6.6MeV までの測定結果を得た。結果は原爆速中性子を評価するのに重要な領域で以前の測定と異なっている。このため、ターゲット中心と銅試料の位置を精度よく設置する方法を用いて、再度測定を行う予定である。(2) ^{63}Ni 標準線源の測定から、0.01Bq 以上であれば信頼できるβ線のスペクトルが測定できるとの結論を得た。(3) ^{39}Ar の測定については、反応断面積等の検討を行った。引き続き検討したい。

4) 広島原爆の被曝線量評価の問題点 (担当：星 正治)

計算の面からの検討結果は、(1) 爆の放射線源からの地表そして放射化までの過程の計算を行う上で、MCNP がどこまでどれくらいの精度で計算できるのかチェックするため、ベンチマークテストを行った。結果として減衰しても全体として 30% ぐらい以内で合っていることがわかった。これは驚くほど合ったといった印象である。(2) 広島原爆の中性子の輸送計算と中性子の吸収に伴うガンマ線の計算を特定のジオメトリーのもとで行なった。この計算でのユーロピウムの生成量と、DS86 で計算したユーロピウムの生成量とは良く一致する。

(3) 爆発点の高度を 90m 引き上げ、爆弾に非等方性のクラックを導入すると、測定データと DS86 計算値とを 1km 以内で合わせることが可能であることを示し、米国側の検討を要求している。

5) γ 線による外部被曝時の口腔内線量分布測

定 (担当：小佐古敏荘)

広島・長崎の原爆被曝者の線量評価に用いられている線量計算モデルを、実測データにより検証することの重要性に鑑み、被曝者の歯のエナメル質を用いた電子スピン共鳴法 (ESR) 測定の際に重要となる口腔内線量分布を測定した。指向性の強い体外被曝の場合、測定に供する歯の位置によって線量の評価値が最大で 30% の幅を生じることが明らかとなった。

6) 1986 年線量評価体系 DS86 再評価における研究活動の総括 (担当：平良専純、藤田正一郎)

DS86 には、広島の中性子に関する計算値と測定値の不一致の問題を中心に不確実性が存在する。DS86 の発表後 14 年の間に、計算能力および測定技術は大きく向上し、その結果、原爆被曝試料における計算値と測定値の不一致をはじめとする、DS86 について以前指摘されていた問題を解決することが可能になってきた。この DS86 に関する不確実性を解消し、新しい原爆線量評価体系を作成するために、日米両国に線量再評価実務研究班を設置し、2000 年 3 月には日米合同会議を開催して研究成果の検討し、日米共同歩調による将来計画について討議した。米国側は、広島原爆のソーススペクトルに関する詳細な計算とこのペクトルに基づいた放射線の空気中輸送計算を行った。さらに、測定データに合わせるための数々の計算技法も紹介しかつ必要に応じて実行することを約束した。そのためにも、遠距離の測定データについての理解を深め、その距離別分布の変動幅を減少させることの必要性が強調された。再度の日米合同会議を経て、2002 年の前半には新しい線量体系 (DS86 の改訂版) を完成させる予定である。この体系は日米それぞれの上級委員会 (今後設置の予定) により承認されるべきものと考えられている。本報告は関係する諸機関への情報提供に資するものと考えられ、また、その成果は世界の放射線防護対策にも影響を与えるものと考えられる。

D. 結論

DS86は、基本的には今日の科学的知見からみて最良のものであるものの、広島の中性子に関する計算値と測定値の不一致の問題を中心に不確実性が存在する。そこで、日米それぞれに線量再評価実務研究班を設置し、このDS86に関する不確実性を解消し、新しい原爆線

量評価体系を作成するための活動を行なっている。研究成果は、2000年3月に広島で開催された日米合同会議においても検討された。再度の日米合同会議を経て、2002年の前半には新しい線量体系（DS86の改訂版）を完成させる予定である。

原爆被爆者の被曝線量再評価に関する研究の総括

分担研究者 葉佐井 博巳（広島国際学院大学工学部長）

1. 研究目的

この研究班は広島・長崎の原爆線量評価体系（DS86）と残留放射能測定から推定した中性子線量の間には矛盾がある事を指摘し、その事を立証し確認するため長年にわたり研究を進めてきた。その結果、爆心からの距離と線量の関係は、測定値が DS86 に示す値より近距離で小さくまた遠方では大きい値を示している事が明らかになってきた。その違いの原因についてさらに検討を重ね、被爆者の被曝線量を明らかにする。

2. 研究方法

中性子のデータは、主として熱中性子による誘導放射能の測定から得られている。即ち Co-60, Eu-152, 等が低バックのガンマ線測定装置で、C1-36 が加速器を使った質量分析法により測定されている。これらのデータはほぼ出尽くしてきたが、一方で速中性子の直接反応 $^{63}\text{Cu}(n, p)^{63}\text{Ni}$ により生成された銅試料中の Ni-63 測定が注目されてきた。この測定は加速器を使い米国やドイツで行われ、データも出つつある。日本でも筑波大学の加速器を使った同種の測定や、液体シンチレータを使った測定、逆同時計数装置による測定などを試みようとしている。いずれにしても測定値と DS86 の推定値の違いについての原因の追求は急務であり、最近ではその検討に入ってきた。原因追求のため次のような方法で検証した。

1) 爆弾のソース：アメリカからの情報からしか得られないが、爆弾の違いが原因なら

長崎の測定値と広島での測定値の比較が重要になる。新たに長崎の被爆資料を調査し採取して、Eu-152 の測定を行った。

2) 輸送計算： 空気中での中性子の散乱、吸収計算や放射化などを検証するため、速中性子と銅の核反応 $^{63}\text{Cu}(n, p)^{63}\text{Ni}$ による誘導放射能測定が必要。速中性子による Ni-63 の反応断面積について検討した。又逆同時計数による低バックグランド β 線測定装置を制作し性能評価と被爆資料の測定を試みた。

3) バックグランド： 環境中に含まれる中性子によるバックグランドの推定や測定と資料中に含まれる天然放射線による影響の考慮が必要。環境中性子による影響評価を行った、又試料中のバックグランドの評価も行った。

3. 結果と考察

1) 爆弾のソース

a) 爆発モデルの提案：爆弾のソースについては米国側の問題で我々は直接知ることは出来ない。そこで測定値に合わせるために爆発モデルを仮想し、もし爆発過程でクラックが出来、又高度の変更が可能なら解決できると提案した。これに対し米国側の何らかの反応を期待している。

b) 長崎の被爆資料測定：爆心から約 1.6 km 地点の Eu-152 の測定を行ったが、その際スペクトルの中に自然放射能のバックグランドが含まれていて、測定値に余分の誤差が生じている可能性があり、さらに追求する必要を認めた。

2) 輸送計算のための測定

a) 速中性子による反応断面積の測定：反応断面積を実験で求めた結果今までより小さい値が出た。しかし線源の強度が 0.01Bq 以上なら測定可能と判断される。

b) 低バック装置による測定：Cf-252 を用いて予備実験を行い、その後広島の本銀行の被曝試料（爆心より 382m、避雷針の電線）の Ni-63 を測定した。結果は DS86 で計算した値より、測定値の方が約 25%高かった。

3) バックグラウンド

環境中性子について検討した結果、遠方では影響がある可能性はあるが、それよりも岩石に

含まれる自然放射能の影響の方が大きいと判断された。

4. 結論

広島原子爆弾から放出された中性子の線量が、DS86 で計算された値と実測値とのずれは様々な測定が示すように明らかになった。長崎を含めて米国にソースや輸送計算の見直しが期待される。我々は今後 Ni-63 の測定を行い精度を上げると同時にデータの相互比較を行うことが必要である。

長崎の原爆残留放射能 ^{60}Co および ^{152}Eu の測定と

DS86 中性子に基づく放射化計算値との比較

分担研究者 静間 清（広島大学工学部共通講座応用原子核教授）

1. 研究目的

広島、長崎で原爆中性子による誘導放射能 ^{152}Eu および ^{60}Co の測定データが蓄積され、また、新しく加速器質量分析法(AMS)により ^{36}Cl のデータも追加された。その結果、広島においては実測データと DS86 中性子による放射化の計算の間に系統的なずれがあることが示された。 ^{152}Eu 、 ^{60}Co 、 ^{36}Cl は主に熱中性子による誘導放射能であるが、新たに速中性子のデータが ^{63}Ni の測定から得られる可能性が指摘されて、現在、被爆した銅資料の収集と測定が進められている。

一方、長崎において原爆線量の実測データを収集することは、DS86 の検証として必要なだけでなく、広島の問題を解決するためには長崎においても残留放射能データを蓄積し、広島と同様の系統的ずれがあるかを明らかにするために意義がある。これまで長崎における残留放射能 ^{152}Eu の測定データはばらつきが大きく違いの有無について明確ではなかったが、Straumeら[1]による AMS による ^{36}Cl の測定からは DS86 中性子に基づく計算と合うとの報告がなされた。このため、原爆線量の再評価において解決ずみとの見方がなされている。しかしながら、 ^{36}Cl の測定は 3 箇所のサンプルについて行なわれただけであるので、さらに多くの場所の測定が必要であることと、 ^{60}Co 、 ^{152}Eu などの他の核種についても確かめることが必要である。

我々は平成 10 年、11 年にわたり、広島、長

崎放射線影響研究所の協力を得て、長崎において爆心から 1km の範囲内で被爆試料の採取を行った。 ^{152}Eu を測定するための試料処理を行ない、測定を行った。本報告では測定結果と DS86 中性子フルエンスにもとづく計算との比較を示す。

2. 材料と方法

長崎の ^{60}Co データを追加するために、爆心から 1km 以内で被爆鉄材 5 サンプルが集められた。サンプリング位置を Fig.1 に示す。これらのサンプルは細片にしたあと、化学処理を行い、Co、Ni が分離された。コバルト濃縮分離試料はガンマ線測定と一部、安定コバルトの分析に用いられた。Table 1 に各試料の爆心からの距離と原試料の重量、濃縮試料の量と Co 含有量を示す。

長崎の ^{152}Eu データを追加するために、爆心から 1000m の範囲内で岩石試料を採取した。試料は、被爆当時の写真などを参考にしながら物陰にならず直接被爆している場所から選んだ。最終的に ^{152}Eu データの導出にもちいたのは 10 サンプルと、爆心から 2.8km の地点から採取されたコントロール試料 1 つであった。Fig.2 にサンプリング位置を示す。これらの岩石試料は粉碎したのち、化学処理を行い、Eu の分離濃縮を行った。濃縮試料はその一部を Eu の含有量の分析に用いた。Table 2 に各試料の爆心からの距離と原試料重量、濃縮試料重量、Eu の含有量を示す。

3. ガンマ線測定

コバルト濃縮試料、ユーロピウム濃縮試料ともポリプロピレン製試験管に入れ、低バックグラウンド井戸型 Ge 検出器で測定した。この測定装置は天然バックグラウンドを低減するために鉛 20cm で遮蔽されている。さらに透過力の強い宇宙線を低減するためにプラスチックシンチレータで囲んで、Ge 検出器との逆同時計数を行う。測定時間は1サンプルにつき約2週間行い、数回繰り返した。ガンマ線スペクトルの例を ^{60}Co についてFig.3に示し、 ^{152}Eu についてFig.4に示す。

4. 結果および考察

長崎の ^{60}Co についての測定結果と計算値との比較をTable3に示す。計算値はSAICのEgbertらにより行われたものである。また、Rev93は酸素、窒素について中性子断面積の見直しが行われた値が使用されている。爆央からの距離で比放射能を示した図をFig.5に示す。

長崎の ^{60}Co データとしてはこれまで、橋詰ら[2]により590mと1030mの距離においてコンクリート中の鉄筋に誘導された ^{60}Co の測定データがある。これらは、広島 ^{60}Co 同様、DS86中性子による計算値とはずれる傾向を示した。本測定ではもっとも近距離の点(NS1)を除くと計算(C)と測定(M)との比(C/M)は0.7~1.9であった。しかしながら、距離の関数として見た全体の傾きは計算より異なる傾向を示している。

長崎の ^{152}Eu について測定結果と計算との比較をTable4に示す。爆央からの距離と比放射

能の関係をFig.6に示す。本研究の測定結果をDS86、93Rev中性子による計算結果と比較するとともに、中西らの測定結果[3]と比較した。中西らは最近、100mと1170m付近で6サンプルについて測定データを報告[4]した。それらは、1100mでの2サンプルは本測定結果に近く、他の2点はDS86より低い。1170mの2点はDS86と一致している。Straumeは822、1187、1261mで加速器質量分析法(AMS)により ^{36}Cl を測定した。その結果はDS86と一致した。Fig.7に長崎の測定データについてのC/Mを示す。中西、Straumeら[1]のデータは計算と一致し、橋詰、本研究の結果はずれを示す。

Fig.8に広島と長崎についてのC/Mを示す。長崎については本研究の結果のみを示している。この結果から、長崎においても広島と同様のずれが見られる。このことは広島原爆に特有の問題のみでなく、中性子の空気中輸送計算にもずれのあることを示唆している。長崎について、測定データが一致しているとはまだ結論できないので、さらに測定精度のよい方法で長崎についてのデータを加える必要がある。

参考文献

- 1) T. Straume et al., Radiat. Res. 138: 193-200; 1994.
- 2) T. Hashizume et al., Health Phys. 13:149-161; 1967.
- 3) T. Nakanishi, H. Ohtani, R. Mizuochi et al., J. Radiat. Res. 32, Suppl.69-82(1991)
- 4) T. Nakanishi, K. Miwa, R. Ohki, J. Radiat. Res. 39, 243-250 (1998)

Table 1. Steel samples and specific $^{60}\text{Co}:\text{Co}$ activity in Nagasaki at the time of bombing.

No	Place	Material	Depth (cm)	Altitude (m)		Distance (m)		Steel Weight (g)	Enriched sample	
				Ground	Sea	Ground	Slant		Weight(g)	Co (mg g^{-1})
NS1	Takatani house	rebars ^a	3.3	1	27	290 ± 21	561 ± 23	260	0.46	13.4 ± 0.7
NS2	Shiroyama School	rebars	1.5	10	22	540 ± 21	721 ± 23	600	0.80	27.2 ± 1.4
NS3	Nagasaki Univ. Hospital	hand rail	0	20	10	653 ± 21	809 ± 23	1000	0.66	14.8 ± 0.7
NS4	Motoki Bridge	rebars	4.5	-1.5	7	780 ± 21	927 ± 23	950	0.82	18.7 ± 0.9
NS5	Mitsubishi Steel	steel rail	0	0	2	935 ± 21	1063 ± 23	760	1.06	28.8 ± 1.4

^a reinforcing bars in concreteTable 2. Mineral samples for ^{152}Eu measurement in Nagasaki

No	Place	Material ^a	Coordinate ^b (x, y)	Sea level (m)	Ground level (m)	Ground range (m)	Slant range (m)	Sampling weight (g)	Enriched sample (g)	Eu content (ppm)
NM2	Urakami church	R	34.645, -25.167	16	1.7	458 ± 20	671 ± 22	250	2.1	4.1 ± 0.4
NM3	Nagasaki univ. hospital	T	34.629, -25.925	30	20.0	653 ± 21	809 ± 23	240	3.5	10.4 ± 0.9
NM4	Gokoku shrine-B	R	33.704, -25.036	16	2.5	651 ± 20	815 ± 22	1000	4.3	13.1 ± 0.5
NM5	Gokoku shrine-A	R	33.704, -25.036	16	1.0	651 ± 20	816 ± 22	800	3.5	8.1 ± 0.3
NM6	Nanzan school-A	R	34.509, -24.741	30	1.5	704 ± 20	850 ± 22	650	5.4	5.7 ± 0.3
NM7	Shimoda house	R	34.600, -26.093	9	4.0	782 ± 20	926 ± 22	963	12.8	4.4 ± 0.2
NM8	Prefectural gymnasium-B	R	33.504, -24.896	10	1.5	895 ± 20	1024 ± 22	1000	5.90	5.0 ± 0.2
NM9	St. Maria school	R	33.323, -25.210	21	1.0	943 ± 20	1061 ± 22	1000	3.8	5.0 ± 0.2
NM10	Sakamoto-cho graveyard	B	34.719, -26.320	2	0.5	1039 ± 20	1142 ± 22	660	2.3	18.8 ± 0.9
NM11	Maruo-cho(control)	R	33.964, -28.230	30	0.5	2850 ± 20	2889 ± 22	1400	4.8	2.1 ± 0.2

^a R=rock, T=tile, B=brick^b new city map of NagasakiTable 3. Calculated-to-Measured ratios of $^{60}\text{Co}:\text{Co}$ in Nagasaki.

No	Place	Slant range (m)	Measured (Bq mg^{-1})	Calculated (Bq mg^{-1})		C/M ratio	
				DS86	93Rev	DS86	93Rev
NS1	Takatani house	561 ± 23	1.03 ± 0.09	2.6	2.1	2.5 ± 0.2	2.1 ± 0.2
NS2	Shiroyama School	721 ± 23	0.26 ± 0.02	0.47	0.47	1.80 ± 0.14	1.80 ± 0.14
NS3	Nagasaki Univ. Hospital	809 ± 23	0.10 ± 0.02	0.19	0.19	1.90 ± 0.40	1.90 ± 0.40
NS4	Motoki Bridge	927 ± 23	0.070 ± 0.01	0.066	0.066	0.94 ± 0.16	0.94 ± 0.16
NS5	Mitsubishi Steel	1063 ± 23	0.033 ± 0.01	0.023	0.023	0.70 ± 0.13	0.70 ± 0.13

Table 4. Specific activity of $^{152}\text{Eu}:\text{Eu}$ and calculated-to-measured ratios (C/M) for Nagasaki samples

No	Place	Slant range (m)	$^{152}\text{Eu}:\text{Eu}$ ^a (Bq mg^{-1})	Calculated		C/M ratio	
				DS86	93Rev	DS86	93Rev
NM1	Yana bridge	594 ± 22	24.8 ± 2.9	16.0	14.0	0.645 ± 0.08	0.565 ± 0.066
NM2	Urakami church	671 ± 22	6.50 ± 1.10	6.20	6.00	0.954 ± 0.16	0.923 ± 0.156
NM3	Nagasaki Univ. hospital	809 ± 23	2.07 ± 0.28	1.90	1.90	0.918 ± 0.12	0.918 ± 0.124
NM4	Gokoku shrine B	815 ± 22	3.57 ± 0.63	1.70	1.70	0.476 ± 0.08	0.476 ± 0.084
NM5	Gokoku shrine A	816 ± 22	2.73 ± 0.36	1.70	1.70	0.623 ± 0.08	0.623 ± 0.082
NM6	Nanzan school	850 ± 22	1.58 ± 0.33	1.30	1.30	0.823 ± 0.17	0.823 ± 0.172
NM7	Shimoda house	926 ± 22	1.25 ± 0.42	0.67	0.67	0.536 ± 0.18	0.536 ± 0.180
NM8	Prefectural gymnasium A	1024 ± 22	0.96 ± 0.30	0.26	0.26	0.271 ± 0.08	0.271 ± 0.085
NM9	St. Maria school	1061 ± 22	0.86 ± 0.40	0.22	0.22	0.256 ± 0.12	0.256 ± 0.119
NM10	Sakamoto-cho graveyard	1142 ± 22	0.78 ± 0.31	0.12	0.12	0.154 ± 0.06	0.154 ± 0.061

^a Specific activity at the time of bomb explosion

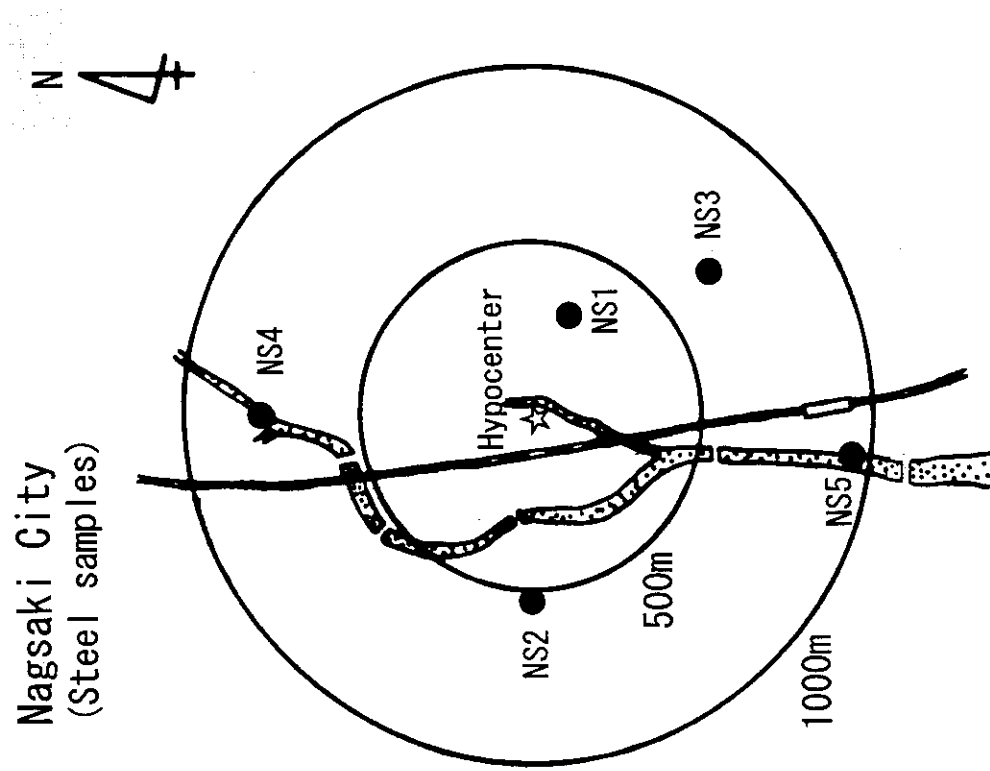


Fig. 1 Steel samples in Nagasaki

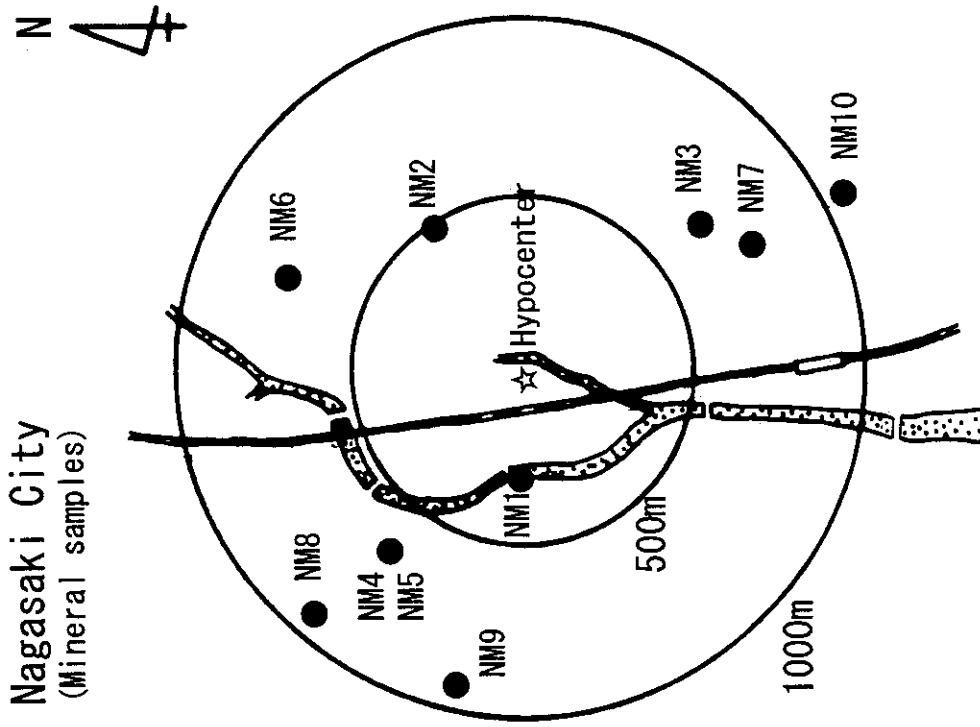


Fig. 2 Rock samples in Nagasaki

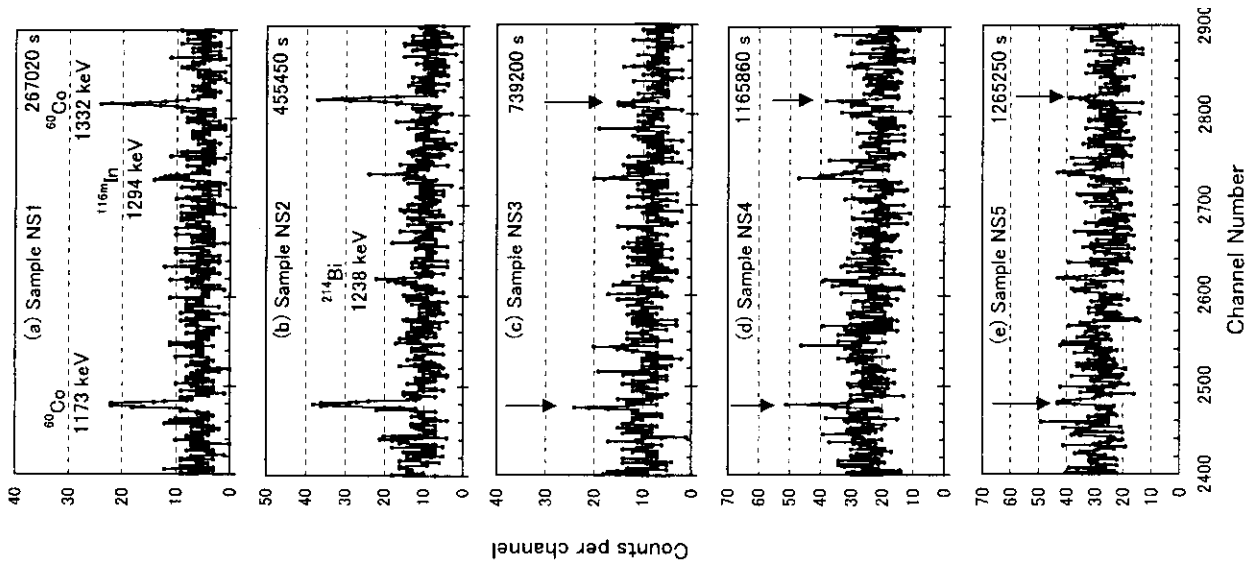


Fig. 3 Examples of ^{60}Co gamma-ray spectra.

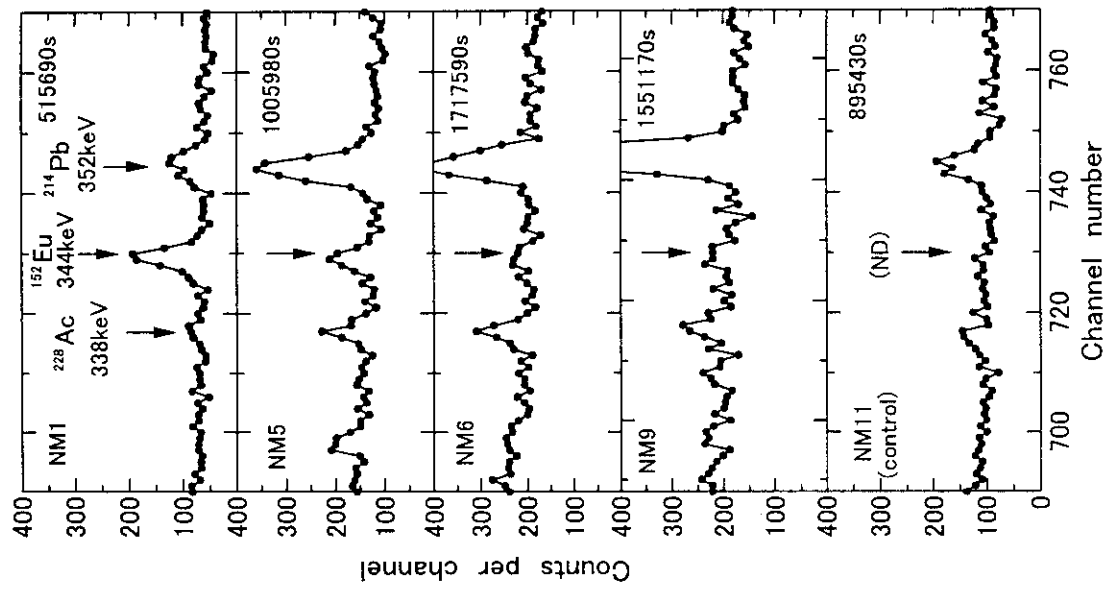


Fig. 4 Example of ^{152}Eu gamma-ray spectra

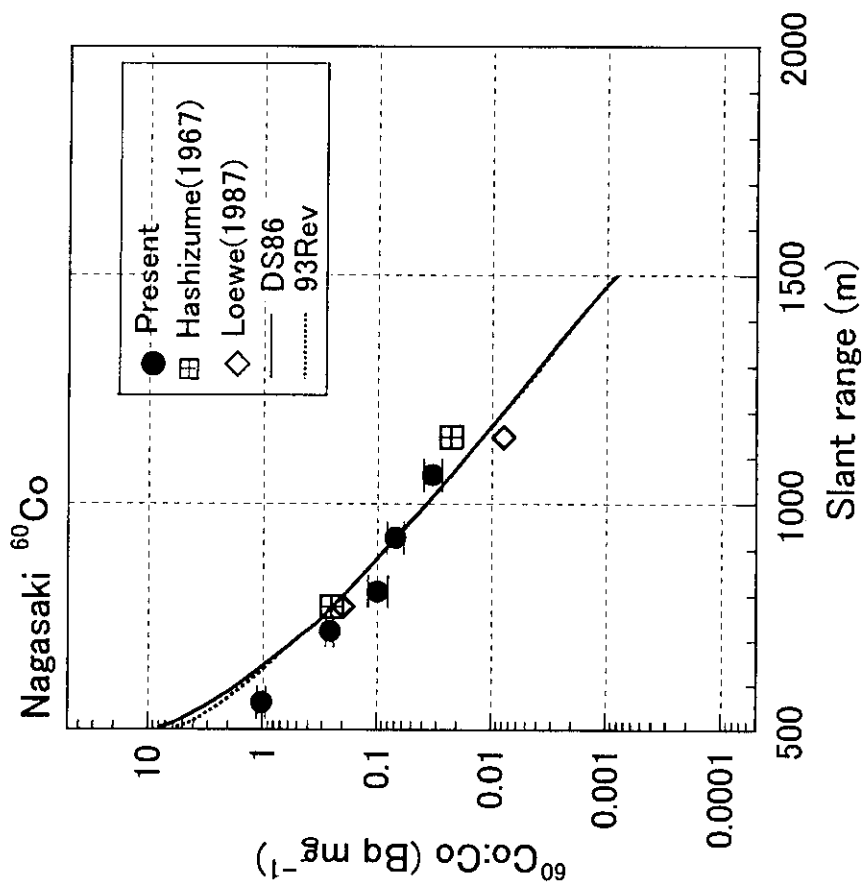


Fig. 5 $^{60}\text{Co}:\text{Co}$ against slant range

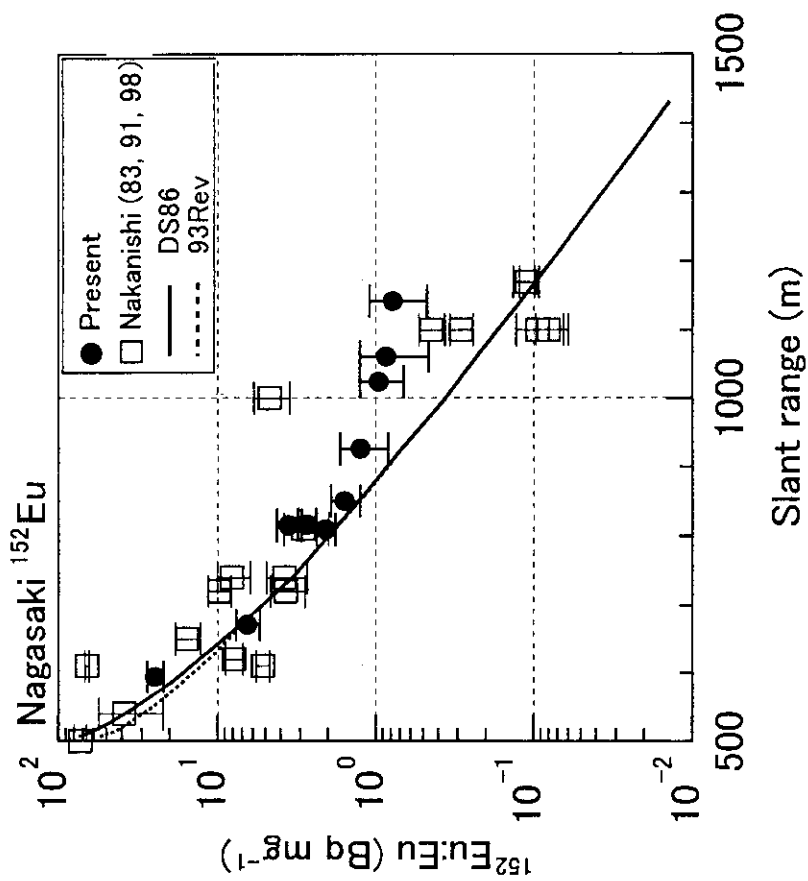


Fig. 6 $^{152}\text{Eu}:\text{Eu}$ against slant range

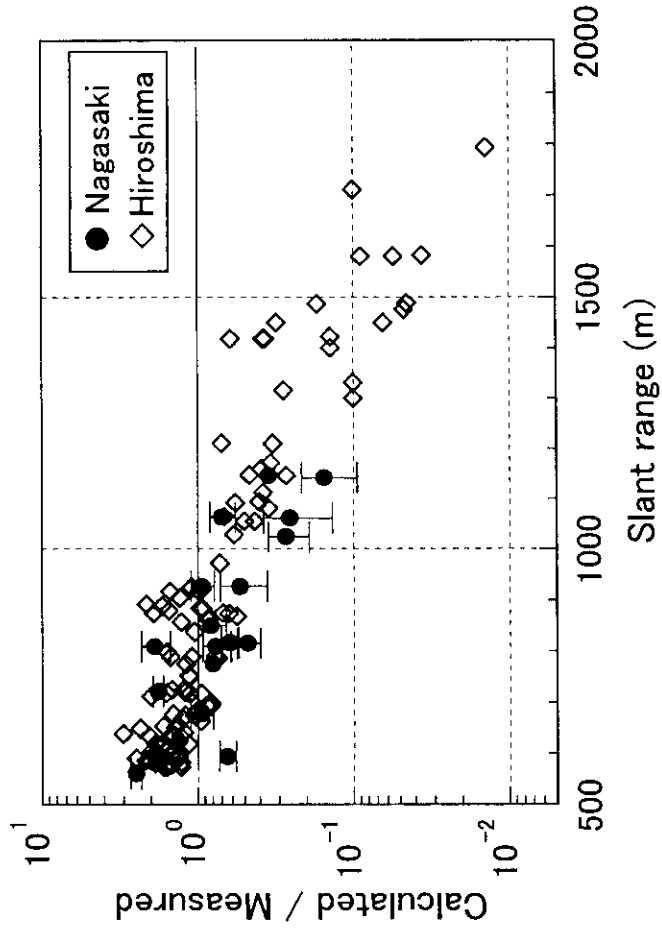


Fig. 8 C/M ratios in Hiroshima and Nagasaki

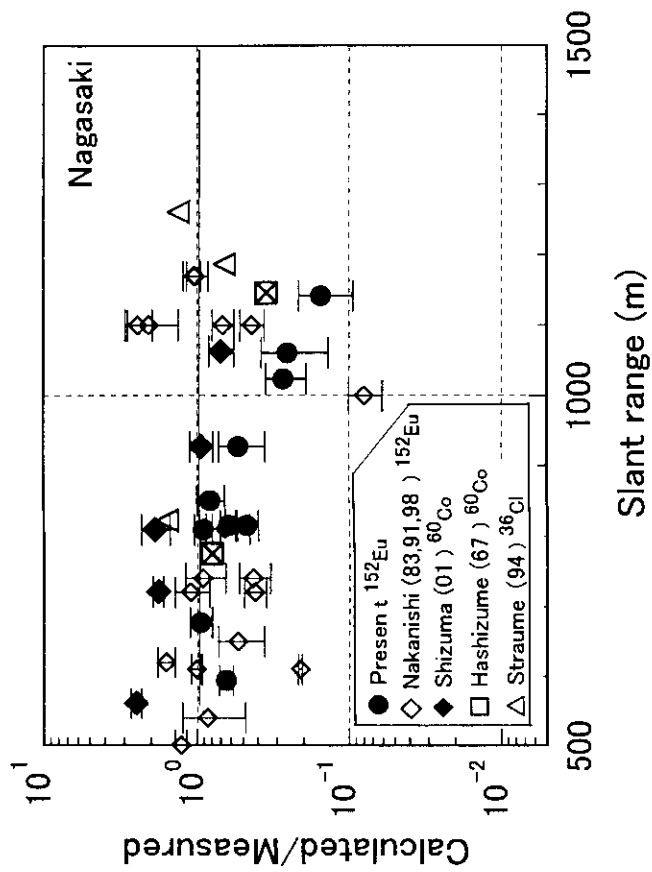


Fig. 7 C/M against slant range

速中性子反応で生成される放射能測定による速中性子線の評価

分担研究者 柴田 徳思（高エネルギー加速器研究機構放射線科学センター長）

1. 研究の目的

原爆速中性子で照射された試料中の放射能測定により、速中性子線の評価を行う。

2. 研究の方法

速中性子で放射化された試料の測定により、速中性子束の評価をする方法としてこれまでに用いられたのは、硫黄中に $^{32}\text{S}(\text{n,p})^{32}\text{P}$ 反応で生成される ^{32}P を原爆投下直後に測定した例があるのみである。我々のグループは、速中性子で照射された銅試料中に、 $^{63}\text{Cu}(\text{n,p})^{63}\text{Ni}$ 反応により生成される ^{63}Ni を測定して速中性子束の評価をする方法を提案した。 ^{63}Ni は半減期 100 年で、現在でも生成された ^{63}Ni の 69% が存在する。 ^{63}Ni は低エネルギーβ線（エネルギーは 67keV）を放出する。したがって、化学分離法により銅試料から極微量の ^{63}Ni を取りだし、β線を測定することにより、原爆速中性子の評価ができると考えられる。

この方法の困難な点は、化学分離により極微量の ^{63}Ni を純度よく取り出す方法の開発が必要であること、予想される ^{63}Ni の量が少ないことからバックグラウンドが小さく検出効率のよい測定方法を開発することが必要である。他の方法として $^{39}\text{K}(\text{n,p})^{39}\text{Ar}$ 反応で生成される ^{39}Ar を測定する方法が考えられる。 ^{39}Ar の半減期は 269 年と長く、生成された放射能の 88% が現在でも存在している。 ^{39}Ar は ^{63}Ni と同様β線を放出する。β線のエネルギーは 565keV でエネルギーが高いので測定は比較的容易である。但し、試料中から ^{39}Ar を取り出す方法を開発する必

要がある。

原爆速中性子で照射されて生じる放射能の量は、照射された時の中性子スペクトルと生成される原子核反応断面積の各エネルギー毎の値を用いて与えられる。中性子スペクトルは DS86 により与えられるので、原子核反応断面積の各エネルギー毎のデータがあれば、測定値を用いて DS86 の中性子スペクトルの評価ができる。

銅試料の場合には、原爆中性子のエネルギースペクトルと強度は DS86 に与えられている。 $^{63}\text{Cu}(\text{n,p})^{63}\text{Ni}$ 反応断面積の各エネルギー毎の値が与えられると、DS86 で与えられた速中性子スペクトルを用いて、 ^{63}Ni の生成量を計算できる。銅試料の測定で ^{63}Ni の量が定量できれば、DS86 で与えられる速中性子スペクトルが原爆速中性子を正しく評価しているかどうかを知ることができる。

$^{63}\text{Cu}(\text{n,p})^{63}\text{Ni}$ 反応断面積のエネルギー依存性を測定するため、東北大学速中性子実験施設で中性子による銅ターゲットの照射を行い反応断面積を求めた。

広島原爆で照射された銅試料のうち、市役所の避雷針、醤油工場の避雷針、広島文理大付属小の雨樋について測定を行ってきたが、バックグラウンドを超える計数値を得てはいるが、スペクトルの形が ^{63}Ni のものと異なるスペクトルを示している。このため、測定法の限界を調べるために、標準線源を用いて液体シンチレーションカウンタでどこまで低い ^{63}Ni を測定できるか検出法の限界を調べた。また、化学分離手

順に新たな操作を加えて広島文理大付属小の
兩種の試料を測定した。

^{39}Ar を用いる方法では、試料中のカリウムより
 $^{39}\text{K}(\text{n,p})^{39}\text{Ar}$ 反応で生成される ^{39}Ar を測定する
ことになる。試料中の ^{39}Ar を取り出す方法、
および $^{39}\text{K}(\text{n,p})^{39}\text{Ar}$ 反応のエネルギー依存性の
測定について検討を開始した。

3. 研究結果と考察

(1) $^{63}\text{Cu}(\text{n,p})^{63}\text{Ni}$ 反応の断面積測定

1.8MeV から 6.6MeV までの測定結果を得た。
得られた結果を図 1 に示す。速中性子の評価に
重要な 1.8MeV から 2.6MeV の測定結果がこれ
までの我々の測定値より低い値を示している。
これらの結果は、各測定の高エネルギー端で断
面積が急激に減少する傾向を示す。これは測定
上の誤りの可能性がある。測定は球殻上のター
ゲットを用いて、D+D 反応により角度毎に異
なる中性子エネルギーが発生されることを用
いてエネルギー依存性を測定している。球殻の
中心と中性子発生ターゲットの中心がずれて

いると、角度毎の中性子エネルギーが設計した
時の値と異なる。この影響をシミュレーション
を用いて調べたところ高エネルギー端で断面積
の減少する傾向のデータとなることが示され
た。

$^{63}\text{Cu}(\text{n,p})^{63}\text{Ni}$ 反応の断面積の結果は原爆速
中性子を評価するのに重要な領域で以前の測
定と異なっている。このため、ターゲット中心
と銅試料の位置を精度よく設置する方法を用
いて、再度測定を行う予定である。

(2) 標準線源による極微量 ^{63}Ni の測定

^{63}Ni の標準線源の強度が 0.01Bq から
0.2Bq の範囲で測定したところ、ほぼ線源強度
と測定から求めた強度は矛盾のないことが確
認された。異なる濃度の線源によるスペクトル
を図 2 に示した。 ^{63}Ni 標準線源の測定から、
0.01Bq 以上であれば信頼できる β 線のスペク
トルが測定できるとの結論を得た。

(3) ^{39}Ar 測定の可能性の検討

^{39}Ar の測定については、反応断面積等の検討
を行った。引き続き検討したい。

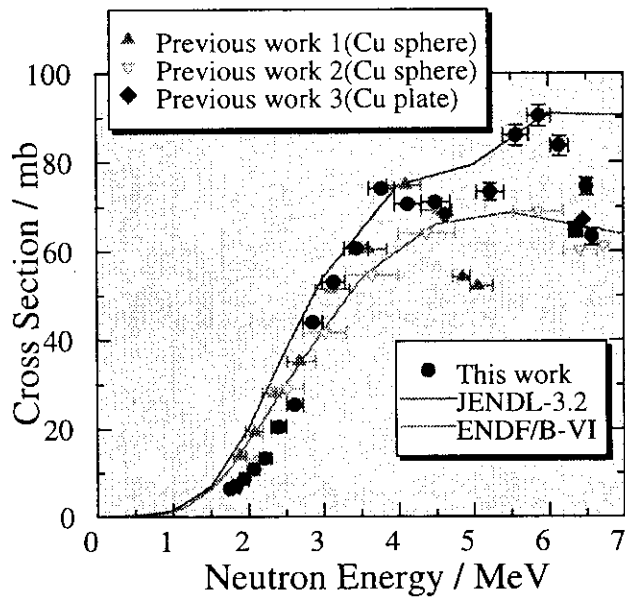


図1 $^{63}\text{Cu}(n,p)^{63}\text{Ni}$ 反応の励起関数

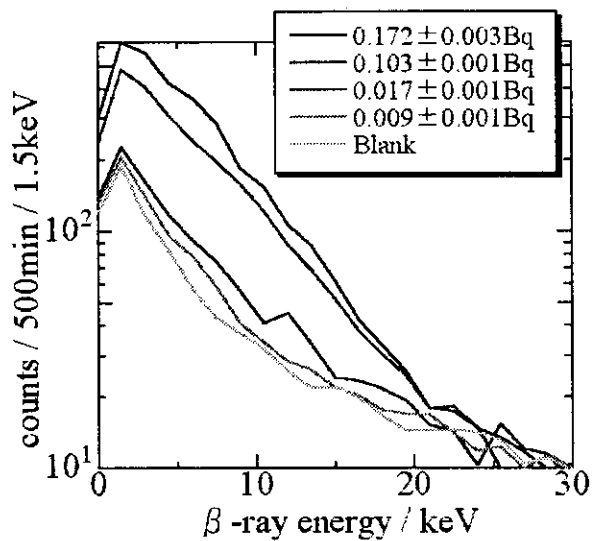


図2 異なる強度の ^{63}Ni 標準線源を測定したスペクトル。データの平均化をしたもの。

広島原爆の被曝線量評価の問題点

分担研究者 星 正治（広島大学原爆放射能医学研究所国際放射線情報センター教授）

1. はじめに

広島長崎の原爆の放射線量見直しが1986年に行われた。この被曝者個人の線量を評価するシステムのことを線量評価体系(Dosimetry System 1986(DS86))と呼んでいる。⁽¹⁾ その線量再評価の作業は日米の共同研究で進められた。日本側は被曝試料を使って実測をすることによりデータを取った。アメリカ側はスーパーコンピュータを使って計算により被曝者個人個人の線量推定した。その結果日本側はアメリカ側の計算と比較する事を主な目的とした。まず花崗岩、コンクリートなどの原爆の被曝試料を収集し中性子で誘導され生成した放射能(コバルト60、ユーロピウム152)を測定した。⁽³⁻¹²⁾ これは中性子の線量評価に使うためである。またガンマ線に対しては屋根瓦やレンガ、タイルを収集し、熱蛍光法により線量を評価した。ここでの問題点は、ガンマ線は熱蛍光法での線量評価は直接ガンマ線の線量ができる。しかしながら、人体への被曝は数100keV以上の中性子が中心であるのに、これらの放射化は熱中性子による。従って直接中性子の被曝線量を評価するデータとならない。従って被曝者の線量を決定する上ではこの熱中性子の量から速中性子の線量評価をしなければならないことであった。

またアメリカ側は当時のスーパーコンピュータを使った計算を行った。それらは、1. 原爆の爆発地点での中性子やガンマ線のスペクトルの計算(線源項)、2. 爆発地点から地表までの輸送計算、3. 地面、日本家屋での透過

計算、4. 被曝者の計算モデルを使った各臓器の線量計算、である。これらには、過去のネバダでのデータなどが参考にされ、日本家屋も集合体としていろいろなタイプが試された、膨大な仕事であった。

このDS86が出来上がった後、私どもの広島グループや金沢、長崎のグループ、放射線影響研究所、などで引き続き被曝試料の測定を行ってきた。データがある程度集まってくると、図1にユーロピウムの測定とDS86に基づいた計算との比較を示すが、系統的なずれが見出された。⁽⁶⁾ その後原因を解明するためMCNPによる計算を行うことにした。原因解明の上で、問題となるのは爆発地点のガンマ線や中性子のスペクトルのチェックが基本的にできないことである。すなわち核爆弾の構造を調べたりすることは私どもの仕事ではない。したがって他の原因を一つ一つチェックし正しいかどうかつぶしてゆく方法で進めることにした。^(23-25, 26-27) まず計算精度を確かめる作業を行った。

1. ベンチマークテストをMCNPコード⁽²⁴⁾を使っておこないその精度を確認した、その後原爆本体から出た中性子のスペクトルに問題があるとの確信を得たので、2. いろいろなスペクトルや放射線の放出方法を考えて輸送計算を行いどのようなスペクトルでどのような放出方法を考えたら良いかを検討した。これら1、2について報告する。

この作業全体において使用したコードはMCNP3A、MCNP4A、MCNP4Bである。主として使用した核データはENDF/B-IV、V、

VIであり、その他のMCNPにつけてあるデータ及びJENDL3⁽²⁸⁾も必要に応じて使った。

2. ベンチマークテスト

原爆の放射線源からの地表そして放射化までの過程の計算を行う上でMCNPがどこまでどれくらいの精度で計算できるのかチェックするため、ベンチマークテストを行った。⁽²⁵⁻²⁶⁾ 計算で使った中性子の放出数は 10^5 から 5×10^6 個である。

広島大学原爆放射能医学研究所には ^{252}Cf のカリフォルニウム252核分裂中性子線源がある。これはもともと原爆放射線と同様な線源での生物影響を調べる目的で導入された。

この装置で核分裂中性子の物質中での透過、放射化の実験を行い、MCNPの計算と比較検討をした。図2がその実験系である。中心には5cmの厚さで $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ の広さを持つ板を65cmの厚さになるようならべた。その周りは0.5mmのカドミウムの板で覆った。中性子の入口以外はボロン3.7%入りのポリエチレン(商品名ニューライト)で実質の厚さが15cm以上になるようならべた。

中心の吸収体はいろいろな成分を持った材質を試した。ナイロン、アクリライト、水、塩化アンモニウムの粉末、花崗岩、ニューライトなどである。それぞれの板の中心に放射化のための金属箔などを貼り付け5cm毎の放射化量を測定した。これにより空気や材質中での輸送計算放射化の計算精度の検討を行った。相対的な厚みとしては、空気中の透過としてみると、65cmの厚さは大体爆心から1500mくらいに相当する。放射化箔には熱中性子や熱外中性子の検出を行うためのものと、速中性子を検出するためのものを用意した。前者には中性子を吸収する金、ユーロピウム、コバルトを使い、後者には (n,p) や (n,n') 反応をみる、ニッケルやインジウムを使った。照射した金属箔はゲルマニウム検出器で測定し放射能の生成量を求めた。

この実験系の問題は散乱して横から入射す

る速中性子があることであり、入口から入射した中性子のエネルギースペクトルに追加されることであった。目的は入射した中性子の変化であり、横から入射する中性子の遮蔽を効果的に行う必要があった。この遮蔽のため15cm厚のニューライト中の、ポリエチレンの成分で速中性子を減速し同時にボロンで熱中性子を吸収した。速中性子がほぼなくなったところでカドミウムにより熱中性子を吸収する。これらにより横からの入射を徹底的になくした。そうして入射の時と比べて100分の1から10000分の1近くまでの減衰するところまで測定と計算とを比較した。これらの結果は星ら、岩谷らに示している。⁽²⁵⁻²⁶⁾

次に大きな問題は金属箔の自己吸収の問題であった。これには最終的には実験で求めた。放射化の実験には50ミクロン程度の厚さの金などを使った。自己吸収の見積もりには1ミクロンまでの各種の厚さの箔を放射化しゼロの厚さの場合を外挿して求めた。この自己吸収の解決は2-3倍の自己吸収があるので重要であった。詳しくは星らに示す。⁽²⁵⁾

図3、図4に一部の例を示す。結果として減衰しても全体として30%くらい以内で合っていることがわかった。これは驚くほど合ったといった印象である。実験の方だけでも手続きとして多くの事柄がある。まずカリフォルニウム線源のフラックスの実験的な決定がある。これは電離箱の測定を基に決定した。次に減衰体のジオメトリの精度、放射化箔のゲルマニウムの測定による生成放射能の絶対値の決定、等々である。またMCNP計算では何回も散乱する際使用される核データの精度の問題、計算の精度の問題、結果の統計精度の問題、等々がある。これらをすべて含めて大体30%以内で合った。

これらのベンチマークテストによりMCNPで輸送計算を行い放射化の計算をする上で十分な精度があると結論した。

3. 広島原爆の中性子の輸送計算と中性子の

吸収に伴うガンマ線の計算

中性子の輸送計算に使ったジオメトリリーを図 5 に示す。空気や土壌の成分には DS86 (RERF 1987) で使われた値を使用した。この空気の密度についてもチェックをした。原爆投下の気象状態に近いときを選んで上空まで実測した。この結果使用した空気の密度のデータは正しいことが分かった。⁽³⁰⁾

原爆の中心には核分裂中性子を置き、その周りに 5cm 厚の球殻状のタンゲステン、その外側に 20cm 厚の球殻状の鉄をおいた。これらは DS86 のスペクトルを再現する事を星ら⁽²⁷⁾が示している。全体は 2km の高さで半径 2km の円筒形の空気を考える。原爆の高さは DS86 で使われているものが 580m で爆発の中心とした。仮説を考える場合は 670m の高さも試した。土壌は 2m の厚さとし 200m 毎の半径の円筒を考えその中での中性子のエネルギースペクトルを計算した。(100m メッシュの場合も試したが、200m メッシュでも問題無かった。)計算結果はそれぞれの同心円の間 100m、300m、500m、700m.....を計算点としプロットした。ガンマ線の場合は地表 1m の点でも計算を出した。

図 1 にはこの球状の模式的原爆で計算したユーロピウムの生成量と、DS86 で計算したユーロピウムの生成量との計算の比較が示されている。図 1 のように模式的原爆で計算しても DS86 と良く一致する。⁽²⁷⁾

中性子の空気や、土壌による捕獲に伴って発生する 2 次ガンマ線の計算についても同様に DS86 と比較した。ガンマ線の種類は 4 通りに分類されていて、それらは 1. 即発ガンマ線、2. 即発 2 次ガンマ線、3. 遅発ガンマ線、4. 遅発 2 次ガンマ線である。しかしながら主な成分はそのうち遅発ガンマ線と、即発 2 次ガンマ線である。遅発ガンマ線は分裂後の核子から出るガンマ線が主でファイアボールやきのこ雲から放出される。即発 2 次ガンマ線は核分裂の際発生する即発中性子が空気や土壌の成分と作用して発生する 2 次ガンマ線である。他の 2

成分はこれらの 10 分の 1 以下である。ここでは即発 2 次ガンマ線について DS86 との比較を図 6 に示す。これらもよい一致を示している。

4. 広島原爆の系統的なずれの問題

図 1 に示すように、DS86 で計算した広島原爆の中性子はユーロピウムの生成量を説明できない。それだけでなくコバルト 60 の測定結果もうまく説明していない。以上は熱及び熱外中性子による反応である。その他のデータとして最近加測器マス(AMS)方式で測定した塩素 36 もある。^(13,14,15)これも熱中性子で生成したもので同様な系統的ずれを示している。

広島原爆の中性子により生成した放射能には当時電柱の碍子に使われていた硫黄との (n,p) 反応で生成した、燐 32 もある。この反応は速中性子によっておこされるので今までの反応と違う。また被爆者への被曝線量はこの速中性子によって主として決まり熱中性子の影響は小さい。この放射能燐 32 の半減期は短くもう存在していないが、当時のデータは残っていて、DS86 の際には再評価された。そしてこのデータは DS86 と合っていた。測定により求められた値と計算値との比を取ると、熱中性子の結果は一致して系統的なずれがある事が分かる。近距離でデータが計算より小さく遠距離で大きい。このことは図 8 の上に示されている。もし実験値と計算値が一致していたらこの日は 1 になるはずである。

そこで問題を検討していたが、解決のための良い方法がなかなか見付からなかった。1996 年および 1997 年に日米の再検討のための会議が開かれたがアメリカ側も原因は分かっていた。問題点は何らかのパラメータを変更し、熱中性子のデータを合わせると、速中性子が合わなくなることである。両者を同時に合わすことが困難であった。そうしているうちに球形のシンプルな原爆にそこが割れたと考えがうかんだ。広島原爆はガンタイプといわれ、出口をふさいだ大砲の出口側と砲弾の入口側に 2