

# 1. DS86とDS02について

## 2. 線量評価に追加すべき知見

- (1) 初期放射線
- (2) 誘導放射線
- (3) 放射性降下物
- (4) 内部被曝

広島大学・院・工  
静間 清

# 原爆放射線量に関する研究

T65D (1946-1965)

1946 ABCC(原爆傷害調査委員会)を広島、長崎に  
設立 → 現在、RERF (放射線影響研究所)

原爆の人体に及ぼす生物学的ならびに医学的影響について  
長期的・継続的研究を行う

被爆生存者 広島：2万人、長崎：8千人の追跡調査

⇒ 被爆者の浴びた放射線量が必要となる

1956 極秘プロジェクト「ICHIBAN」計画スタート

○ “放射線研究の中で一番に大切な研究”

○ ジョン・オークシャー (30歳、オークリッジ)

予算：15億/年

1957 ネバダ核実験場で原爆実験を行い、その時の放射線  
量を測定(プラムボブ)

○ 日本家屋を建設し、遮蔽効果の測定

⇒ 「T57D」 暫定線量を発表

1958 原爆実験 … 1946年から1958年まで66回

以後、

★米ソ大気圏核実験の中止

## 1960 タワー実験の開始

○ネバダ核実験場に高さ 500m のタワーを建設

- ・「裸の原子炉」(HPRR) をつり下げる。  
(中性子)
- ・コバルト 60 (1200 Ci) をつり下げる。  
(ガンマ線)

★ 広島型ウラン爆弾が無い！

→ 爆弾のケースによる遮蔽効果がわからない。



Fig. 9. The Health Physics Research Reactor Mounted on Hoist Car on *Bren* Tower

500 m タワー

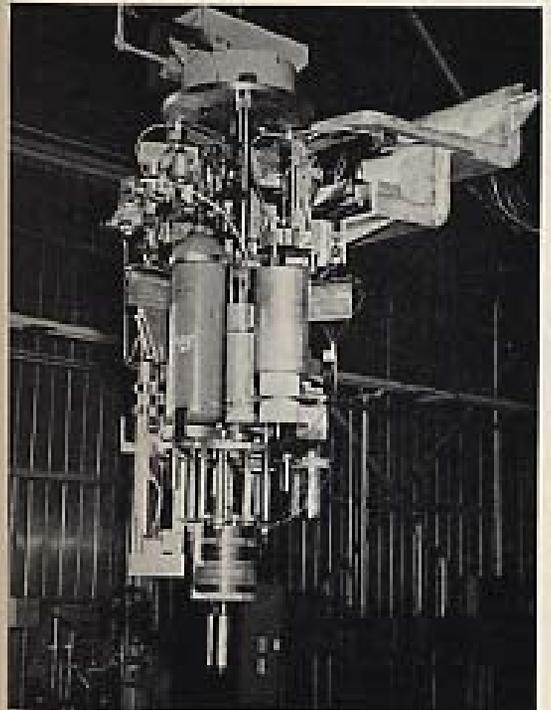


Fig. 8. The Health Physics Research Reactor

裸の原子炉

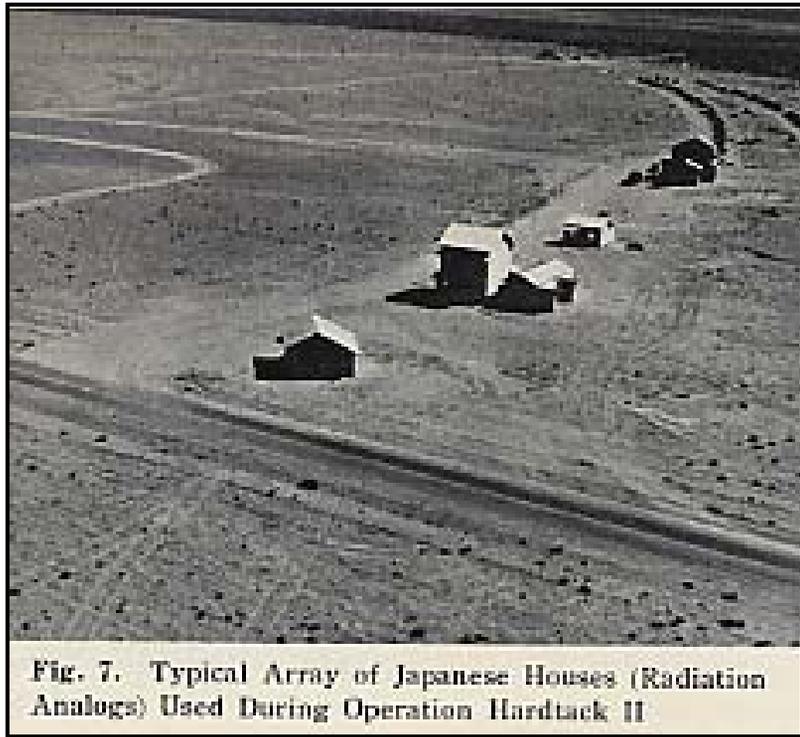


Fig. 7. Typical Array of Japanese Houses (Radiation Analogs) Used During Operation Hardtack II

## ネバダ砂漠に建てられた日本家屋



「タンク」という愛称の巨大な測定器

## 放射線測定器

# 1965 T65D (1965年暫定線量)

誤差、広島：15%、長崎：10%

⇒ 線量の数値のみで、研究内容は極秘

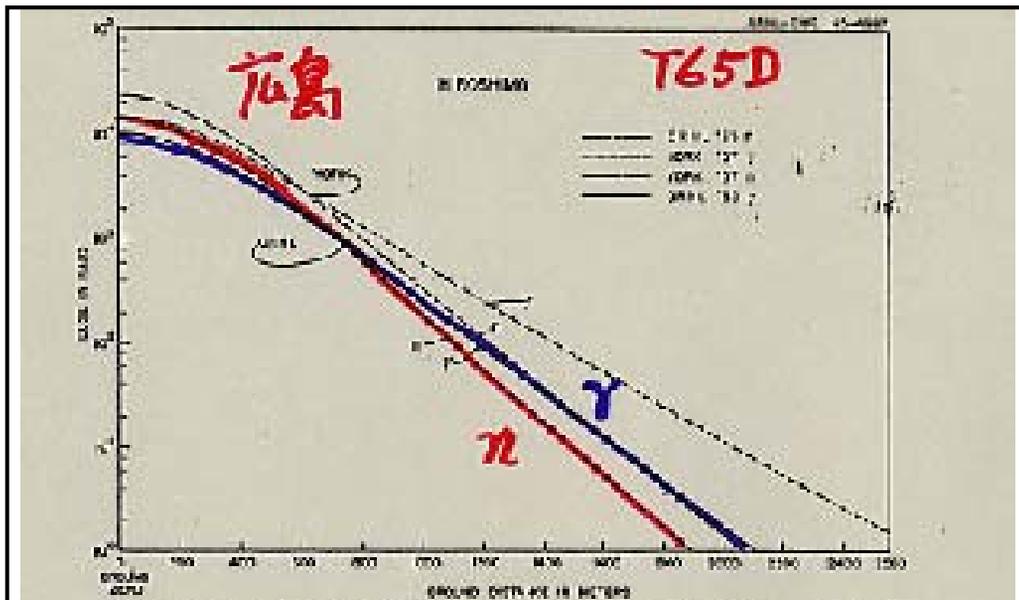


Fig. 10. Radiation Dose as a Function of Horizontal Distance from Ground Zero in Hiroshima

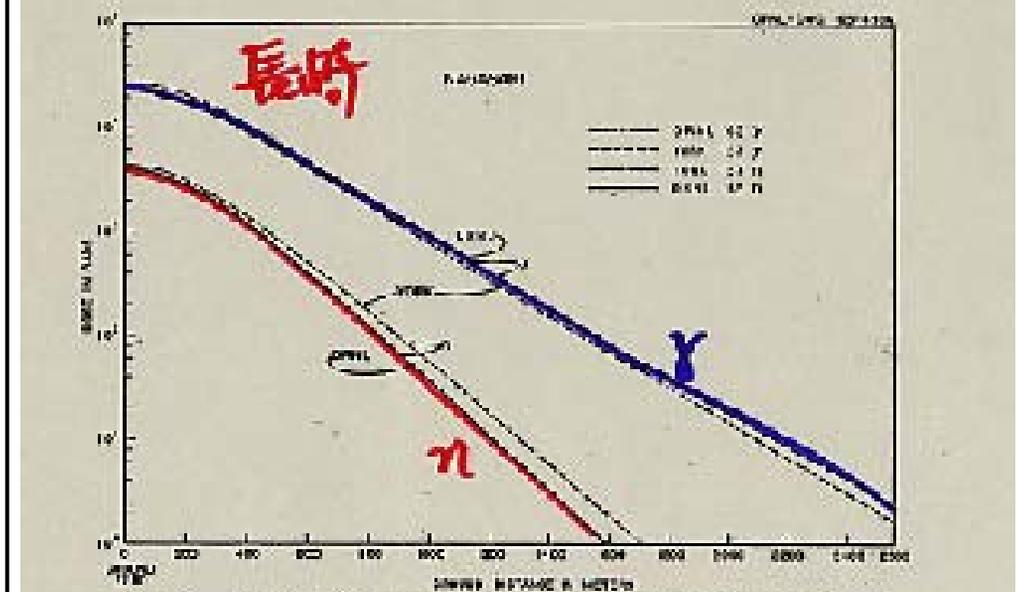


Fig. 11. Radiation Dose as a Function of Horizontal Distance from Ground Zero in Nagasaki

# [核兵器の研究]

・ロスアラモス研究所 ・ローレンスリバモア国立研究所

## 1974 米、限定核戦略構想…「中性子爆弾の開発」

- ・中性子の効果を研究 ⇒ 広島・長崎原爆の見直し
- ・核兵器の出力の計算コードを開発

★ロスアラモス研究所で計算⇒ T65D と異なる結果となった

★DNA (Defence Nuclear Agency) は極秘データを解禁。

→ (極秘に公開し、科学者に線量の見直しをさせるため)

## 1976 リトルボーイ、ファットマンの中性子、ガンマ線スペクトルを公開

プリーグ (ロスアラモス) からノールズ (プリーグに計算を依頼した放射線量の研究者) への私信として公開

## 1981、5 ロスアラモスの倉庫からリトルボーイ3個を発見

⇒ウエーレンは「2次元計算」による中性子スペクトルを発表。



# [5] 原爆線量の再評価 DS86 1976—1986

1978 G.D.カー(オークリッジ国立研究所)は原爆線量見直しの必要性をDNAに通告

⇒1979 DNAはオークリッジに見直しを要請。

★サイエンス誌のマーシャル記者の取材

ロイ(ローレンスリバモア)は独自に計算した結果を示す。

1981、5.22 サイエンスのスクープ記事

→ ロイの計算結果を公表

5.31 広島・長崎の原爆線量に関する第1回ワークショップ  
(ミネアポリス)

## [日米合同ワークショップ]

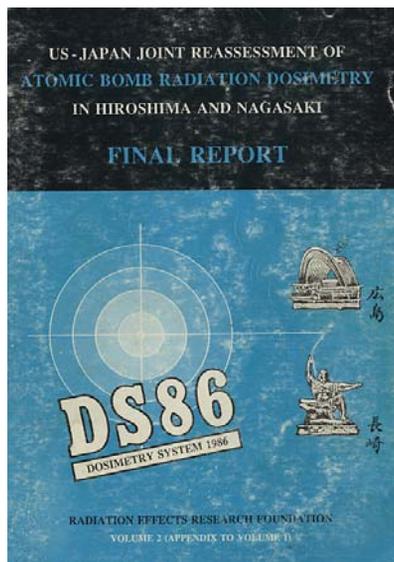
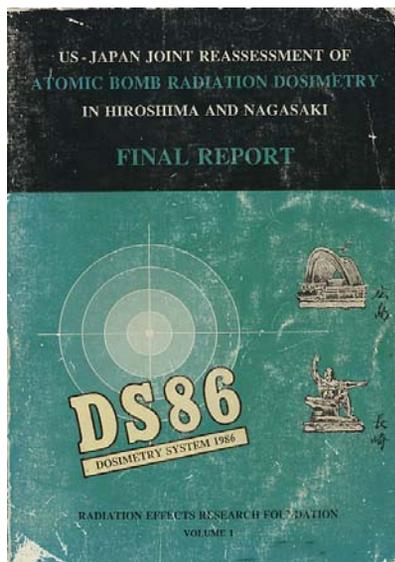
1983, 3 長崎

1984, 11 広島

1985, 3 パサデナ(カリフォルニア)

1986, 3 広島(最終会議)

## 1987 新線量システム DS86 の最終報告書



DS86

広島

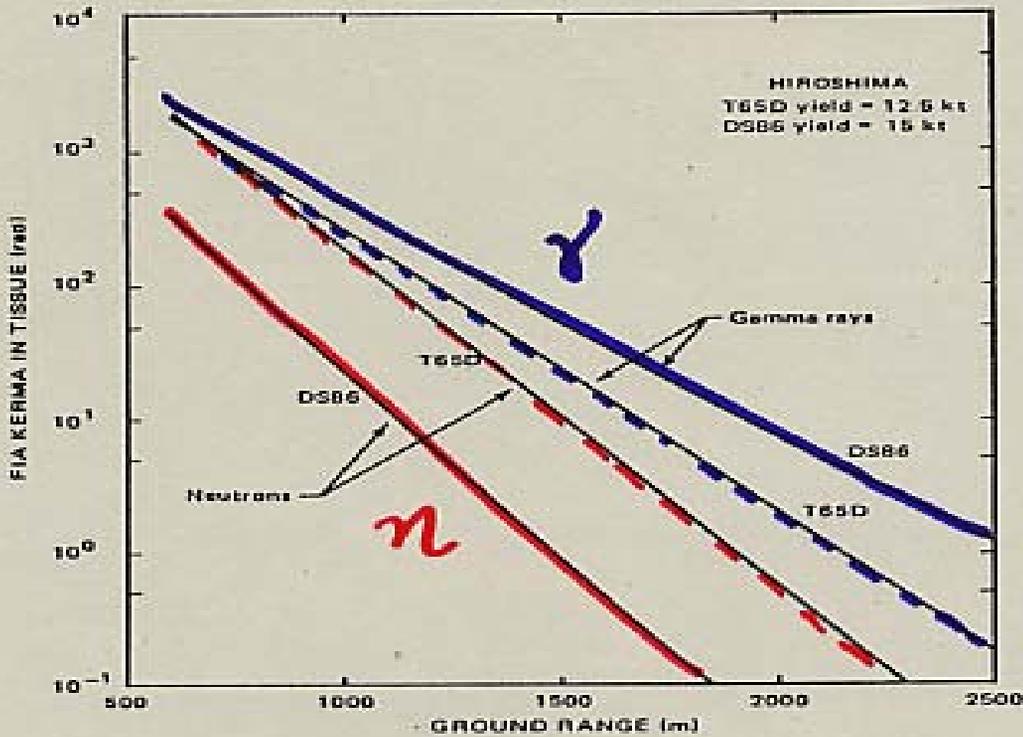
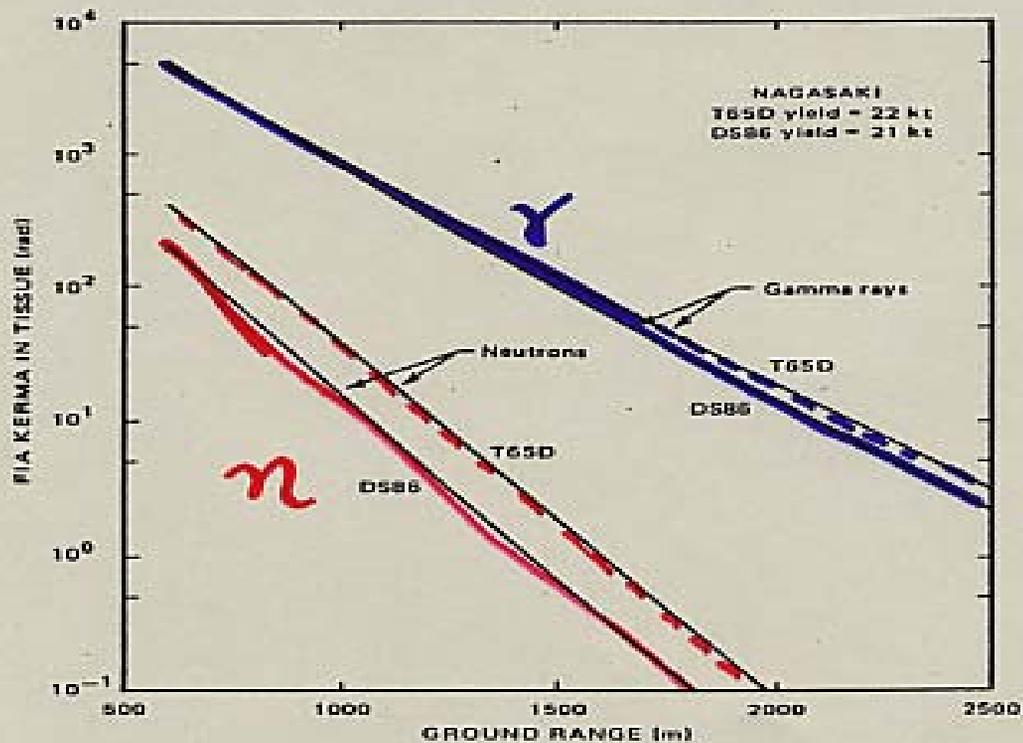


Figure 32. Comparison of DS86 and T65D values for the neutron and gamma-ray kerma in Hiroshima



長崎

Figure 33. Comparison of DS86 and T65D values for the neutron and gamma-ray kerma in Nagasaki

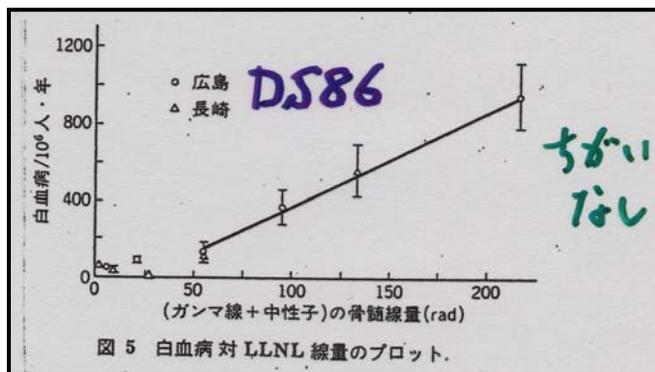
# 何がどう変わったか

## (原爆線量)

- ・ 広島の中性子線量はT65Dの1/10、ガンマ線量は遠距離（1.5km）で2倍
- ・ 長崎の中性子線量は1/2—1/3、ガンマ線量は不変。

## (人体影響)

- ・ ガン・白血病の発生率に広島・長崎の違いがなくなった。



- ・ 被曝線量はT65Dより減少した。
- ・ 放射線のリスクは約2倍になった。

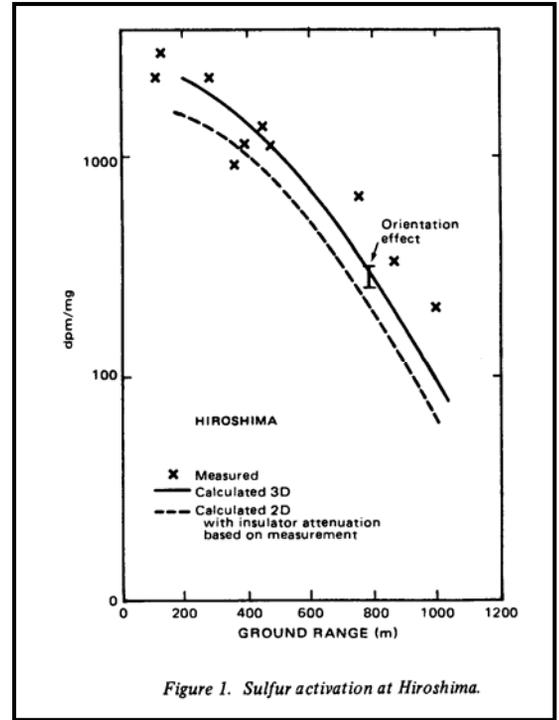
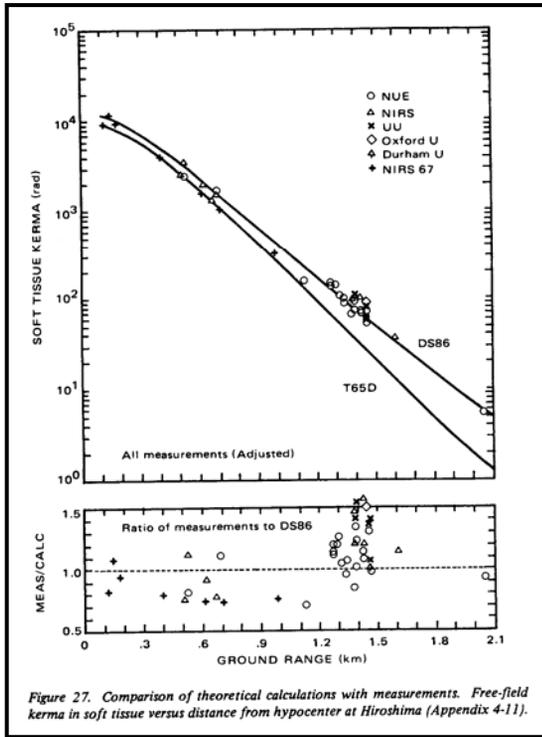


UNSCEAR1988、BEIER-5(1989)、ICRP1990  
の基礎データとなる。

1985 パリ声明 : 公衆の年線量限度  
5mSv/年から1mSv/年

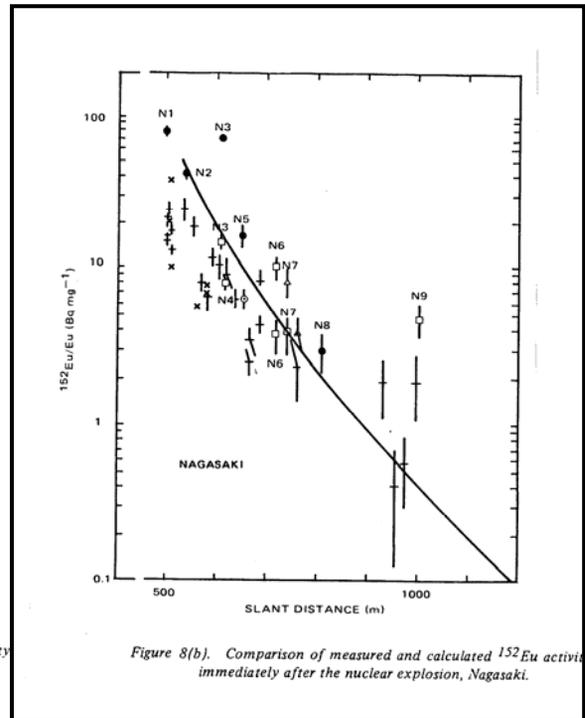
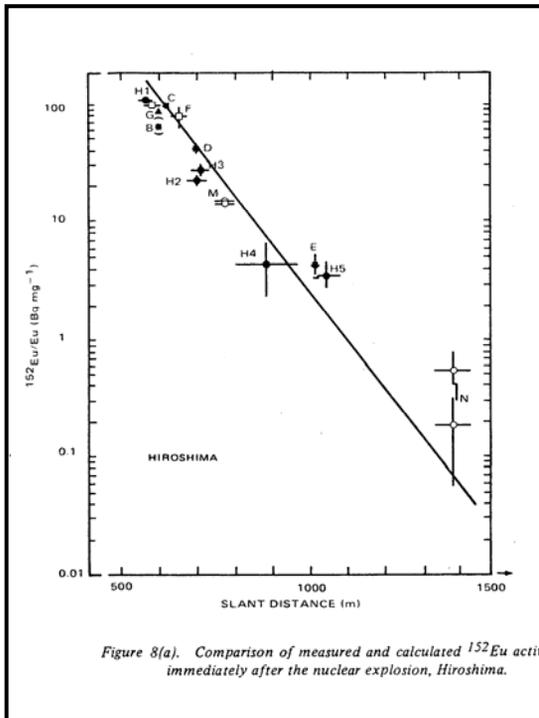
1990 ICRP90 : 職業人の線量限度  
50mSv/年から100mSv/5年  
(ただし、50mSv/年を超えないこと)

# ◆ 残留放射能測定データ



## 熱ルミネッセンスデータ(広島)

## 32P データ



## 152Eu 広島

## 152Eu 長崎

## ※ DS86 の未解決問題

→  $^{60}\text{Co}$ (放医研データ)の測定値があわない!

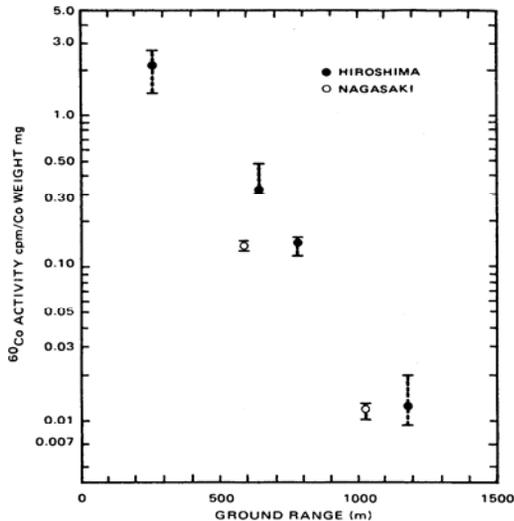


Figure 4. The results of analysis of the  $^{60}\text{Co}$  samples collected at different distances from the hypocenter. Showing the average, maximum, and minimum values obtained from nine samples.

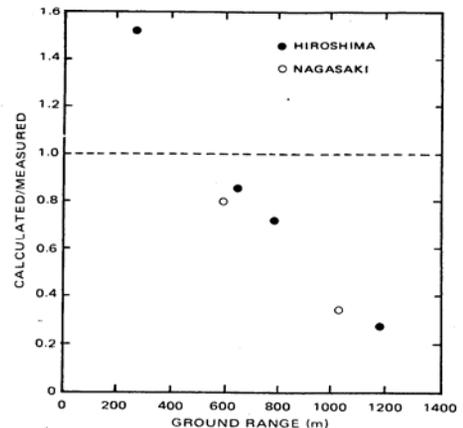


Figure 3. Comparison of measured and calculated  $^{60}\text{Co}$  activities.

DS86を検証するには、広島・長崎の残留放射能を測定するしかない。

## [ 6 ] 広島グループによる残留放射能測定 (1986-2003)

### ① 岩石中の $^{152}\text{Eu}$ 深度分布

- ・ 元安橋
- ・ 護国神社
- ・ 白神社
- ・ 広島銀行

### ② 爆心から半径2km以内の岩石、タイル等の $^{152}\text{Eu}$ 、 $^{36}\text{Cl}$

- ・ 現存するサンプル …… 石垣、墓石など
- ・ 被爆建造物の取り壊し
- ・ 理学部地学教室の被爆試料

#### ※ $^{36}\text{Cl}$ の測定 加速器質量分析

- ・ T. Straume (ユタ大学、LLRL)
- ・ W. Ruehm (ドイツ)
- ・ 長島 (筑波大)

### ③ 被爆鉄材 …… $^{60}\text{Co}$ の測定

- ・ 建物の屋上の避雷針、はしご、手すり

### ④ 銅サンプルの収集 …… $^{63}\text{Ni}$ の測定

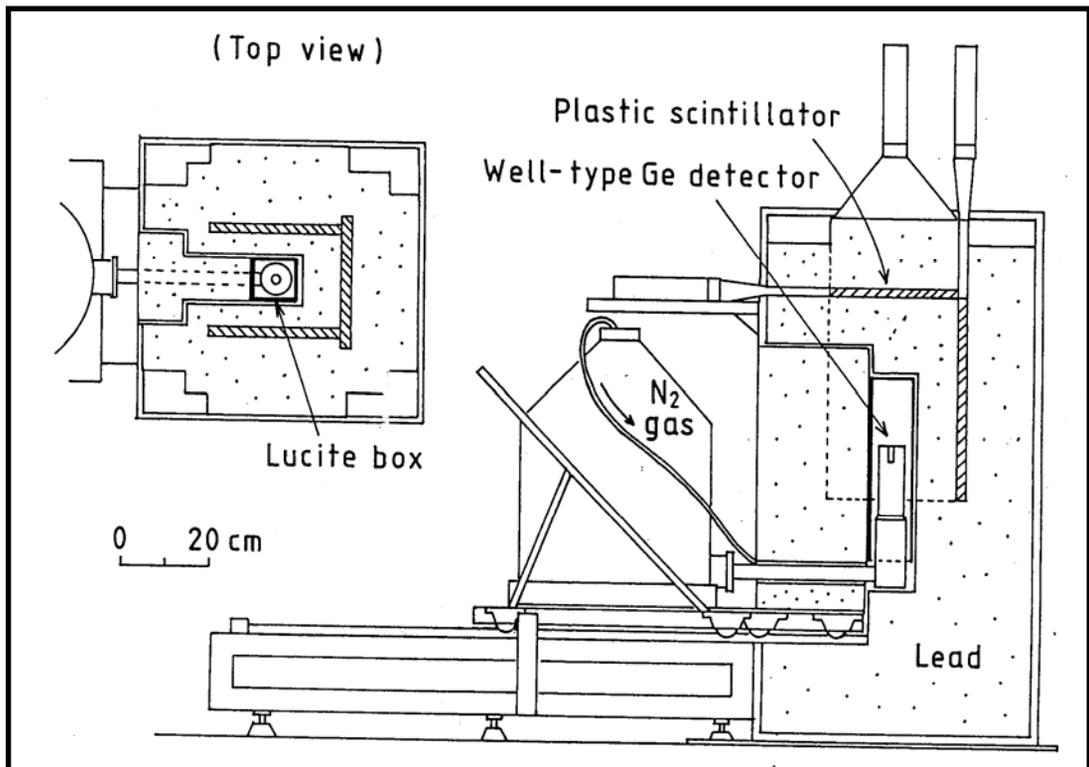
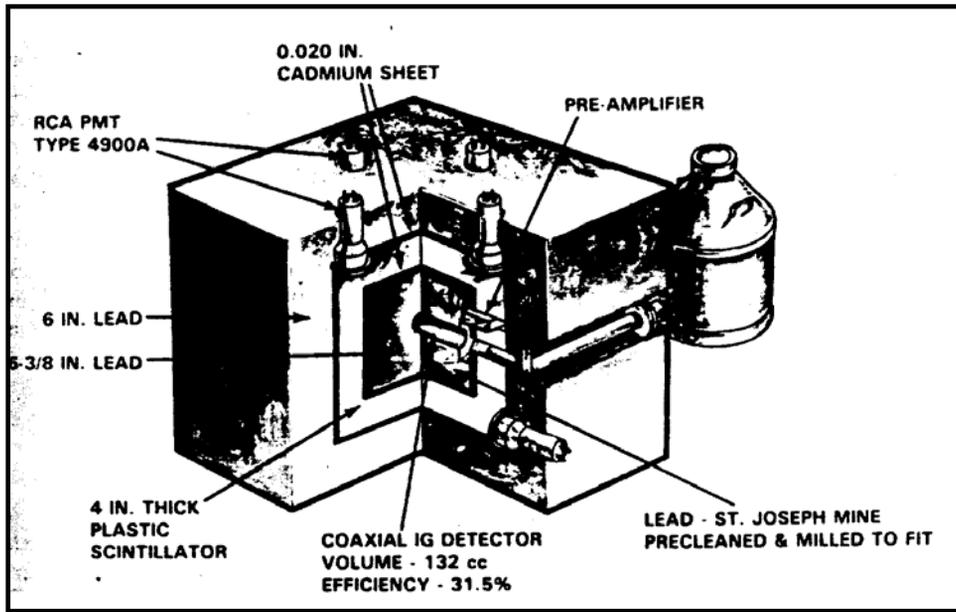
- ・ 速中性子の評価

### ※ 長崎サンプルの測定

- ・ 被爆鉄材
- ・ 岩石試料

# ※工学部に極低バックグラウンドGe 検出器の製作

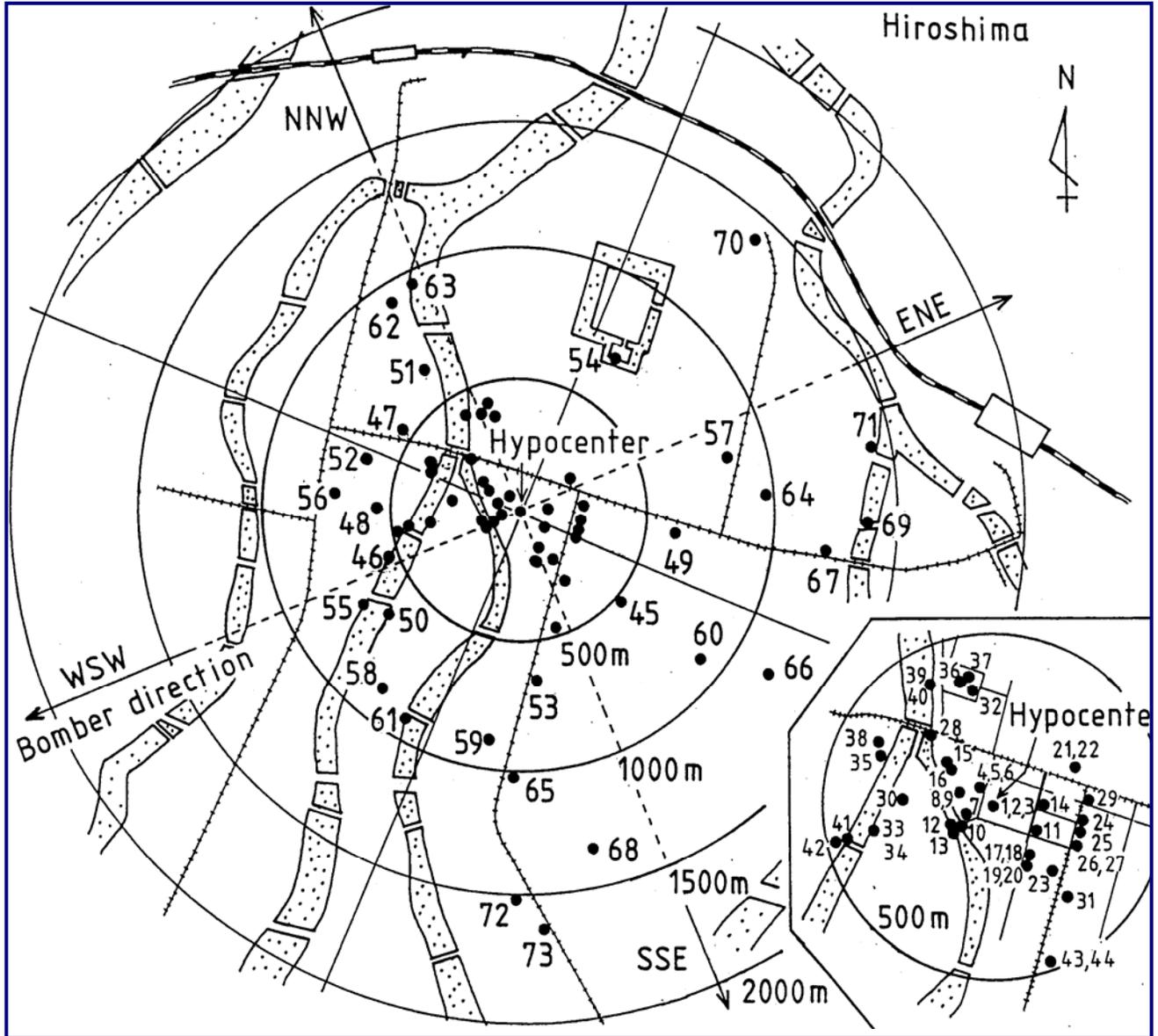
R.L.Brodzinski et.al. NIMA239(1985)



宇宙線逆同時計数式井戸型Ge 検出器

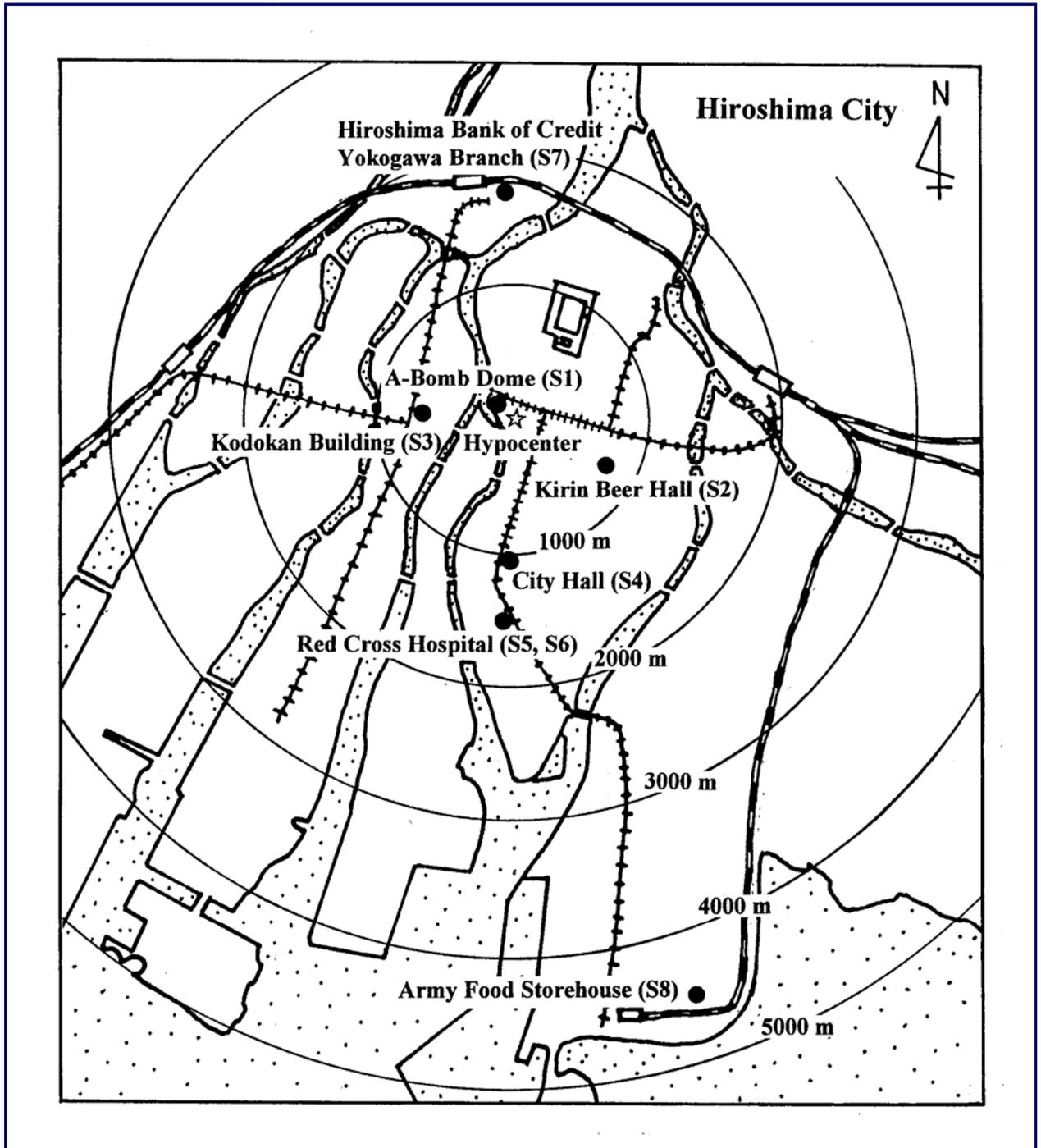
## ②爆心から半径2km以内の岩石等の $^{152}\text{Eu}$

- ・ 現存するサンプル … 石垣、墓石など
- ・ 被爆建造物の取り壊し
- ・ 理学部地学教室の被爆試料



### ③被爆鉄材 ... $^{60}\text{Co}$ の測定

- ・ 建物の屋上の避雷針、はしご、手すり



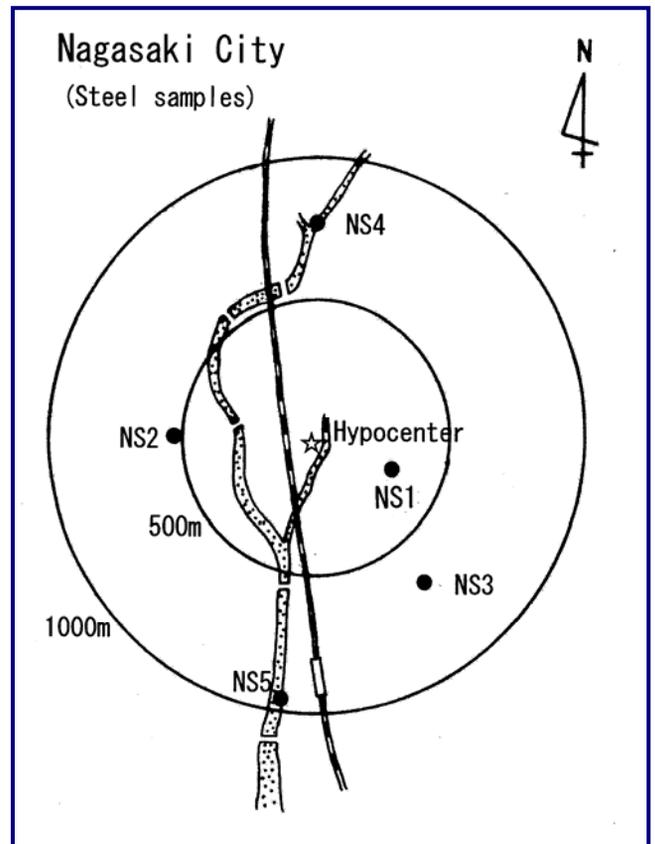
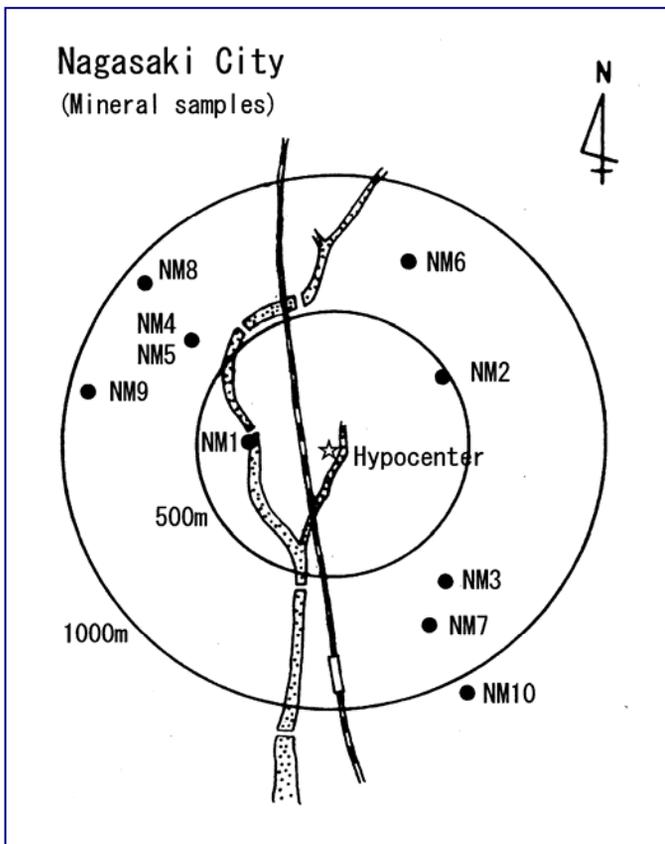
# ◆長崎サンプルの測定

## [岩石試料]

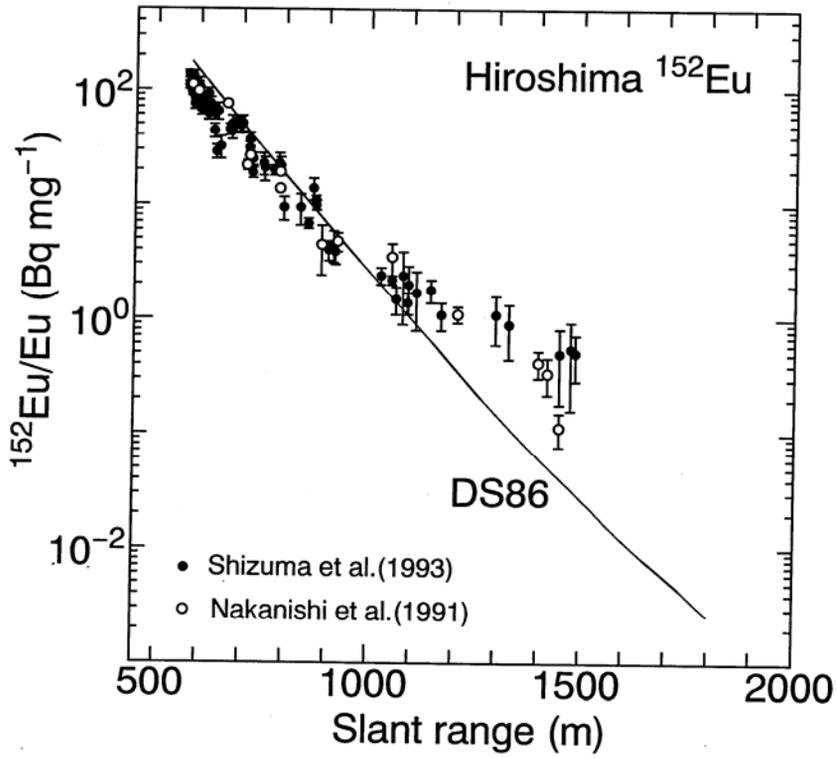
1. やな橋
2. 浦上天主堂
3. 長崎医大
4. 護国神社B
5. 護国神社A
6. 南山高校
7. 下田家石垣
8. 県立体育館石垣
9. マリア学院

## [被爆鉄材]

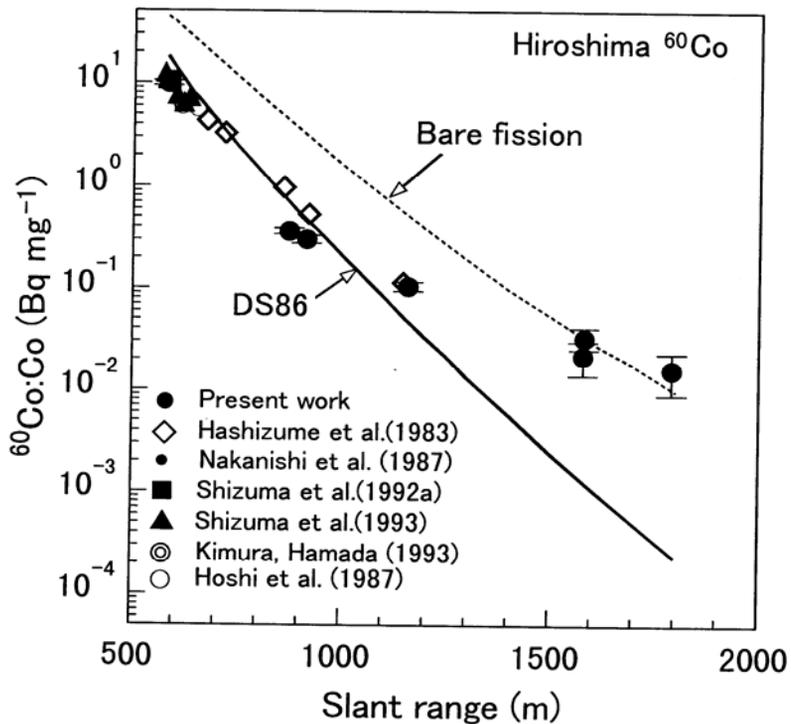
1. 高谷家
2. 城山小学校
3. 長崎医大
4. 本木橋
5. 三菱製鋼



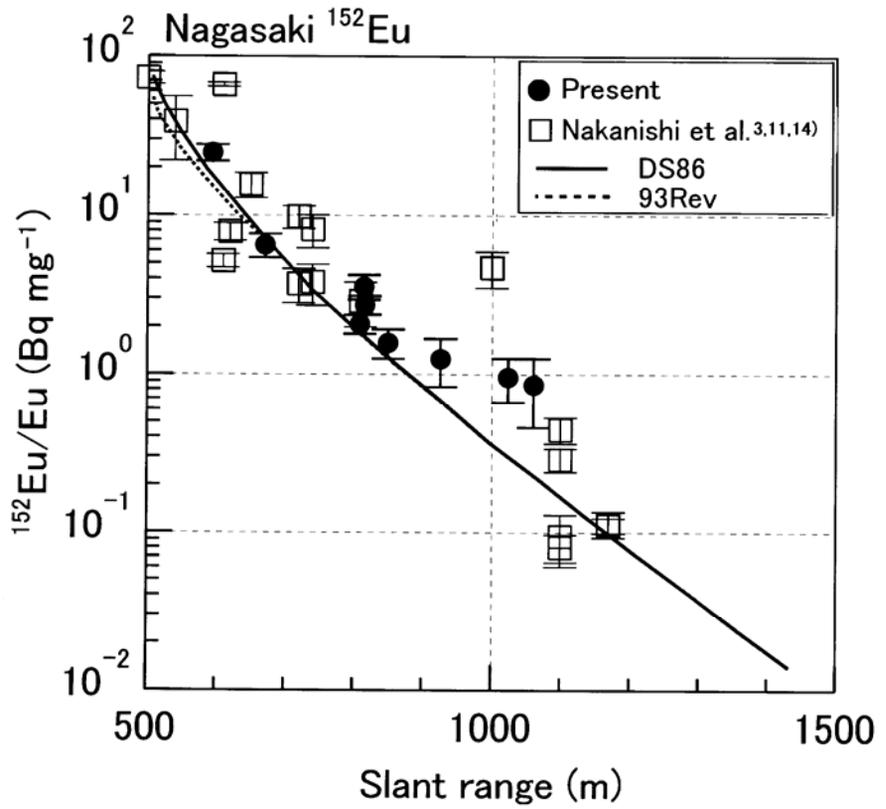
# 広島 $^{152}\text{Eu}$



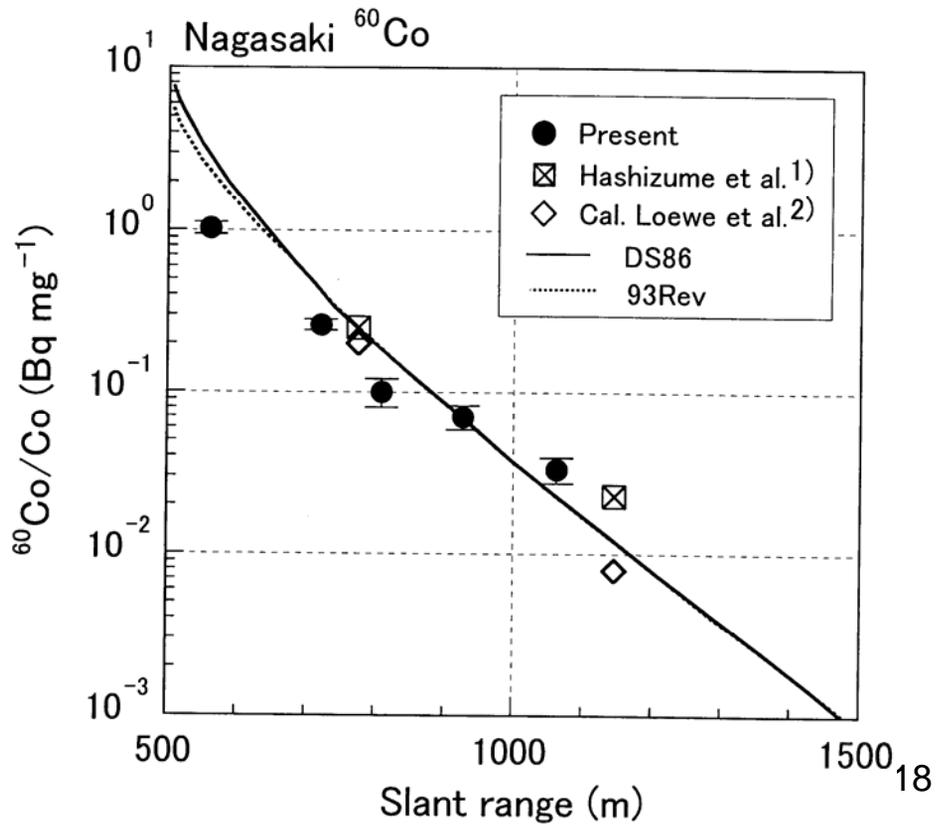
# 広島 $^{60}\text{Co}$



# 長崎 $^{152}\text{Eu}$



# 長崎 $^{60}\text{Co}$



# [7] 新線量システム DS02

(1986-2003)

## 1986 年以降の日米ワークショップ

年月	場所	内容
1989, 3	ハワイ	1986 年以降の成果のまとめと日米に対して今後の研究の勧告
1993		原爆線量 93REV (1990 LANL は原爆出力を再計算)
① 1996, 5	アーバイン	$^{152}\text{Eu}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ のデータ、 $^{63}\text{Ni}$ データへの期待
② 1997, 10	広島	$^{152}\text{Eu}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ のデータ
③ 1999, 1	アーバイン	$^{152}\text{Eu}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ のデータ
④ 2000, 3	広島	LANL 原爆出カスペクトルの詳細計算、出力 16.1kt $^{36}\text{Cl}$ の表面汚染説
2001, 3	広島	(NAS から DOE へ)
⑤ 2001, 6	クリーブランド	・ドイツの $^{36}\text{Cl}$ (花崗岩) が DS86 と合う。 ・NAS のレポート
⑥ 2001, 11	広島	・ $^{36}\text{Cl}$ についての実務者会議 (LLNL, ミュンヘン、筑波) ・ $^{36}\text{Cl}$ の表面汚染
⑦ 2002, 4	広島	・爆発高度を 600m に変更 (最終実務会議?) ・相互比較 ( $^{152}\text{Eu}$ , $^{36}\text{Cl}$ ) LLNL、ドイツ、金沢大 LLRL、筑波大
⑧ 2002, 9	広島	最終実務者会議 (※)
⑨ 9-12		その後も米国はモデル計算継続 ・11 月末、爆発出力を 16kt に変更
⑩ 2003, 1	サンディエゴ パサデナ	日米 WG (出力変更の説明) 上級委員会
2003, 3	東京	上級委員会 (予定)

## ※2002、9 最終報告書の作成の合意内容

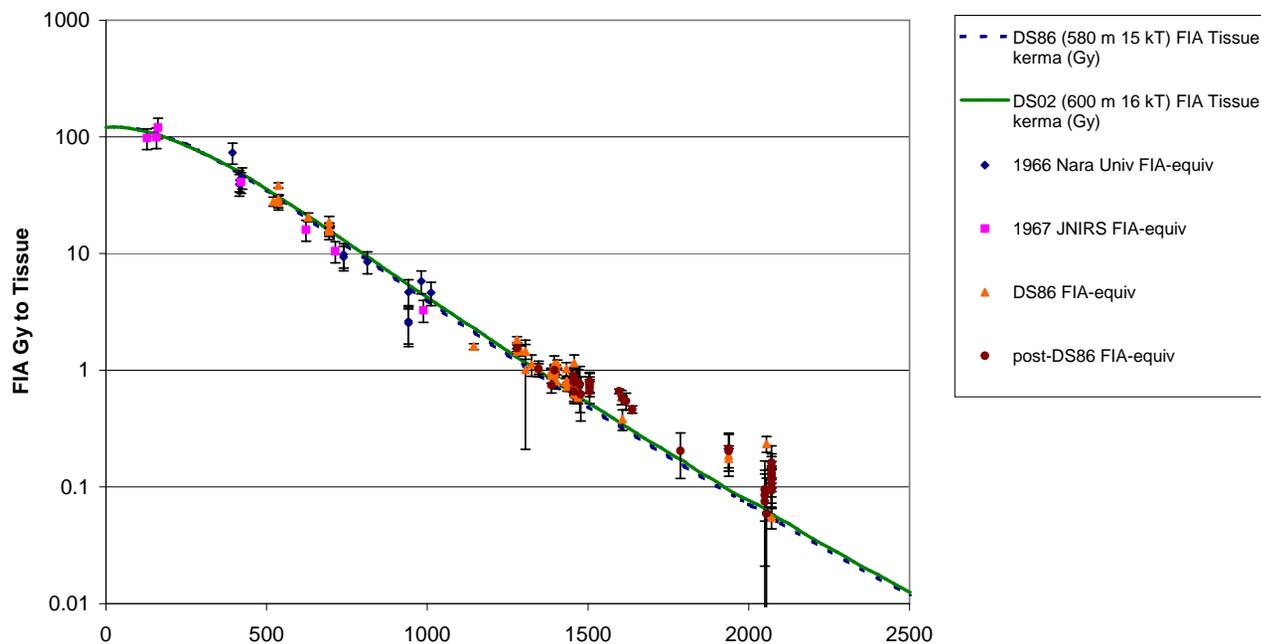
遠距離データはばらつきやバックグラウンド評価の困難がある<sup>19</sup>ので、原爆線量は SR<1km のデータで評価する。

## DS86から変更された点

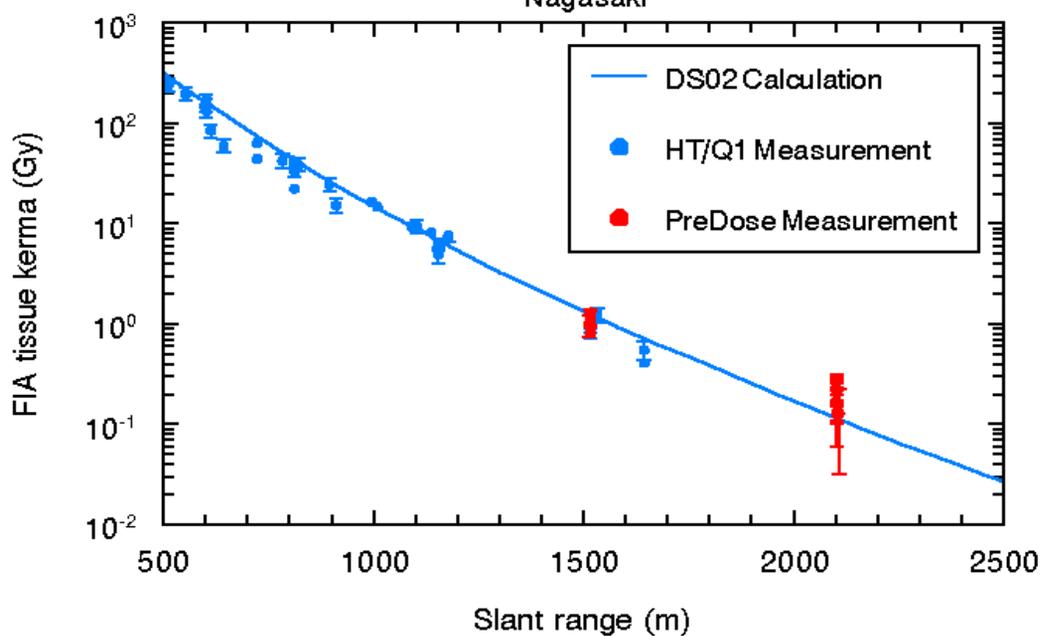
- ①原爆出カスペクトルの詳細な計算が行われた。
    - ・ 中性子のエネルギー群 : 27 から 199群
    - ・ ガンマ線のエネルギー群: 23 から 46群
  - ②鉄の中性子透過実験 : LANSCE (旧LAMPF)  
陽子: 800MeV、 $2\mu\text{A}$  中性子: 0.65MeV~20MeV  
(0.65~2MeVは計算とよく合うが、2~20MeVで計算が低い)
  - ③中性子断面積(窒素、酸素)の改良  
1990、ENDF/B-VからENDF/B-VIとなり窒素、酸素の  
中性子断面積が改良された。
  - ④輸送計算
    - ・ 断面積のライブラリファイル: Vitamine-J (ENDF/B6.2より)
    - ・ Prompt の他にDelayed n,  $\gamma$  の再計算
  - ⑤原爆の爆発高度が580mから600mに変更された。
  - ⑥原爆出力は15ktから16ktに変更された。  
実験データ、LANLの出力計算、圧力測定器、爆風、熱
  - ⑦残留放射能  $^{60}\text{Co}$ 、 $^{152}\text{Eu}$ 、 $^{63}\text{Ni}$ 、 $^{36}\text{Cl}$  の測定値から地上  
1m の空气中線量に変換するためのモデル計算が行われ  
た。
- TF = (実際のサンプル位置での放射化計算) / (地上1mでのFIA放射化計算)
- ⑧長崎三菱兵器工場の生存者40名についての遮蔽計算
  - ⑨爆心は 15m ほど西へ動く。

# TLD測定

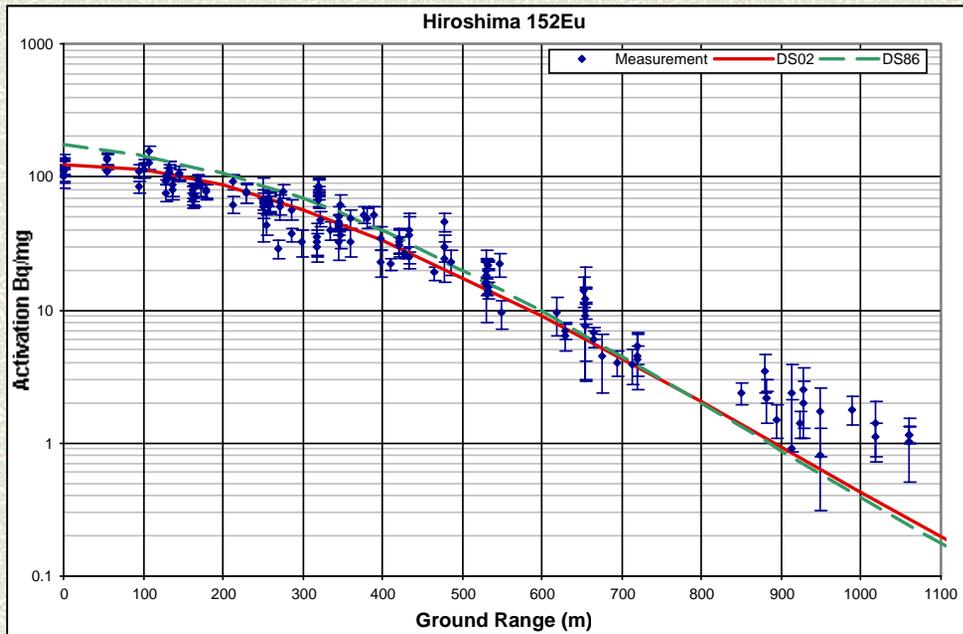
## Hiroshima TLD



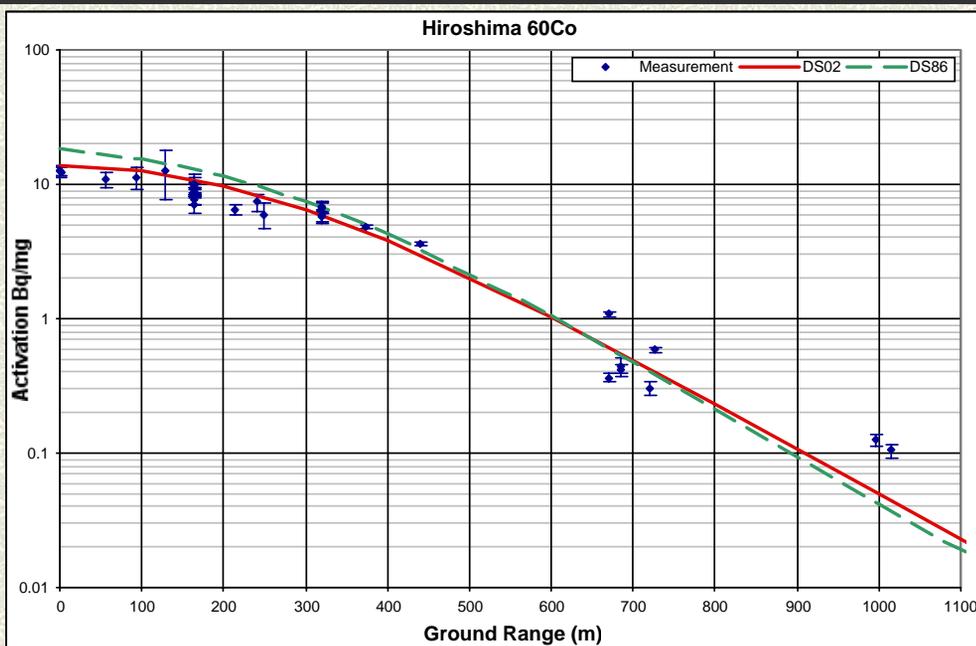
## Nagasaki



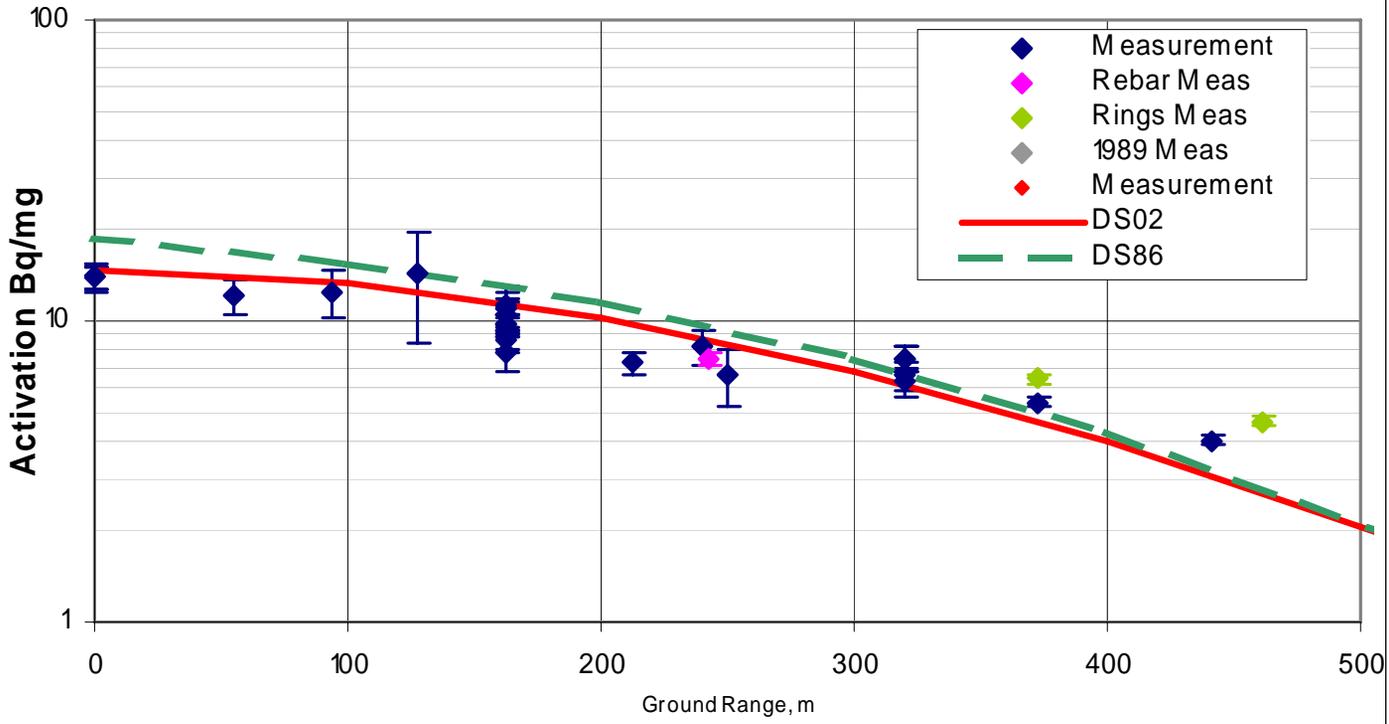
# Hiroshima $^{152}\text{Eu}$ Measurements vs. DS86 for 15kt yield at 580m HOB and DS02 for 15kt yield at 600m HOB Calculation



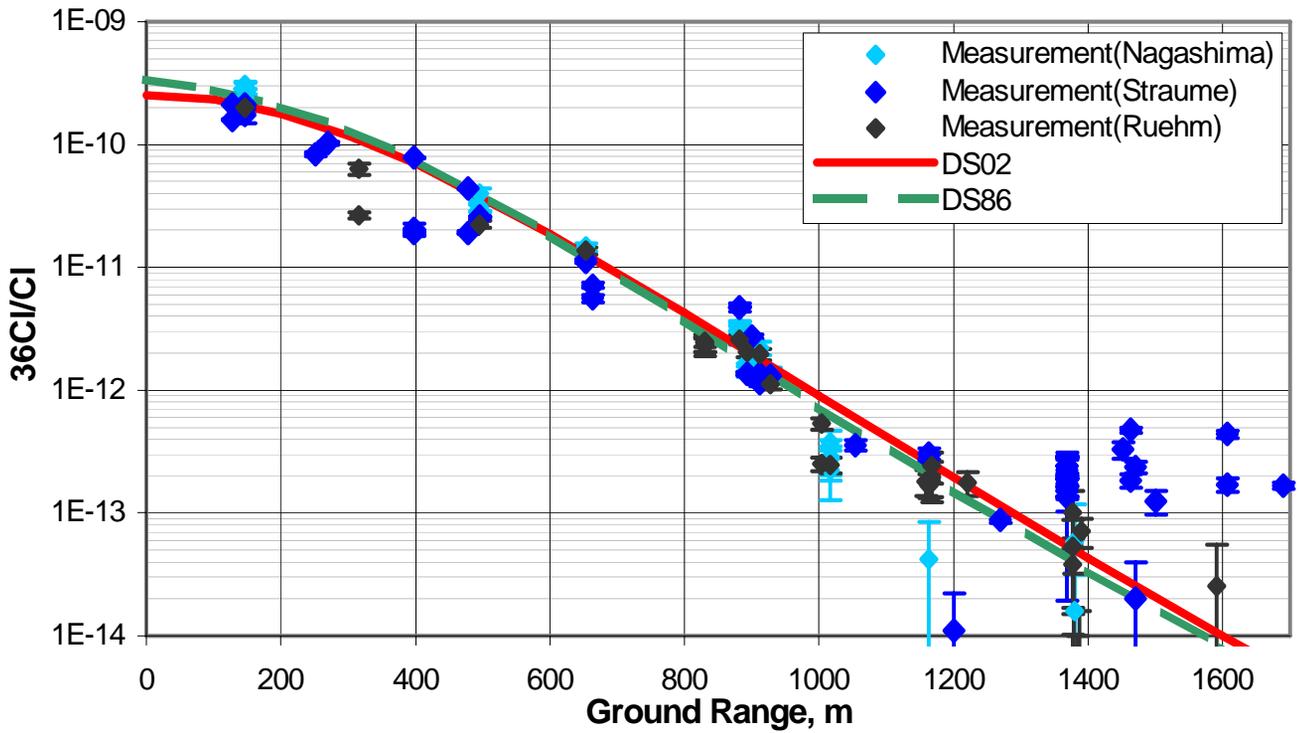
# Hiroshima $^{60}\text{Co}$ Measurements vs. DS86 for 15kt yield at 580m HOB and DS02 for 15kt yield at 600m HOB Calculation



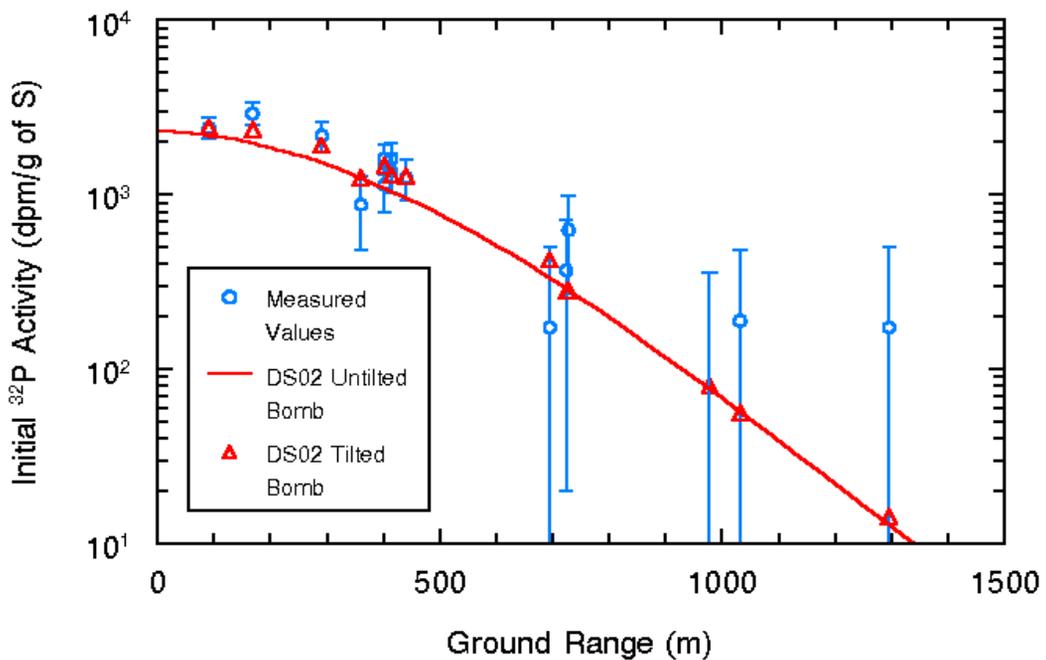
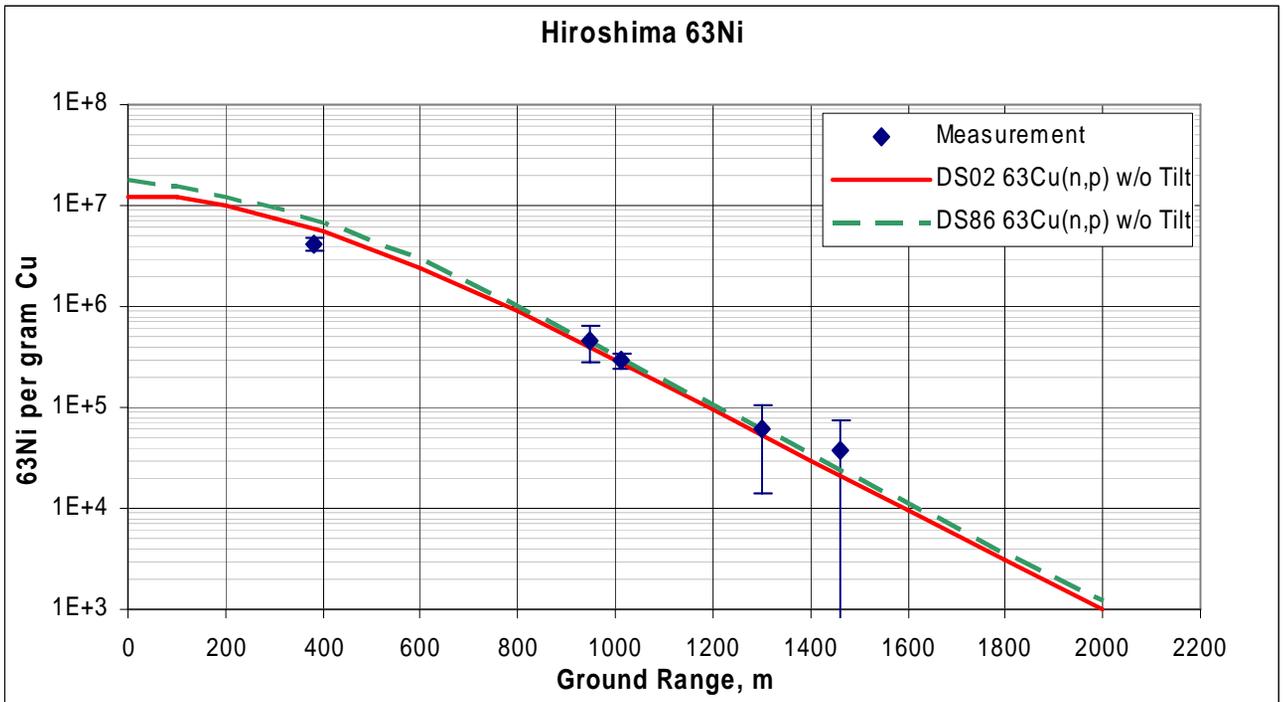
### Hiroshima 60Co



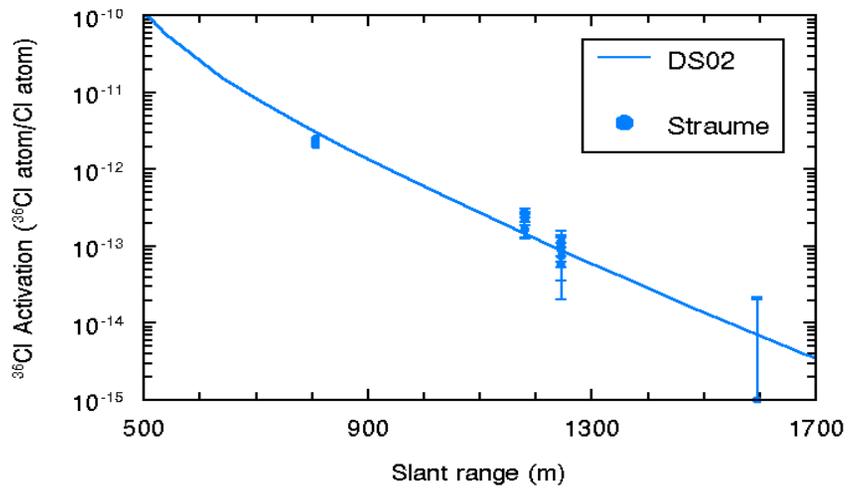
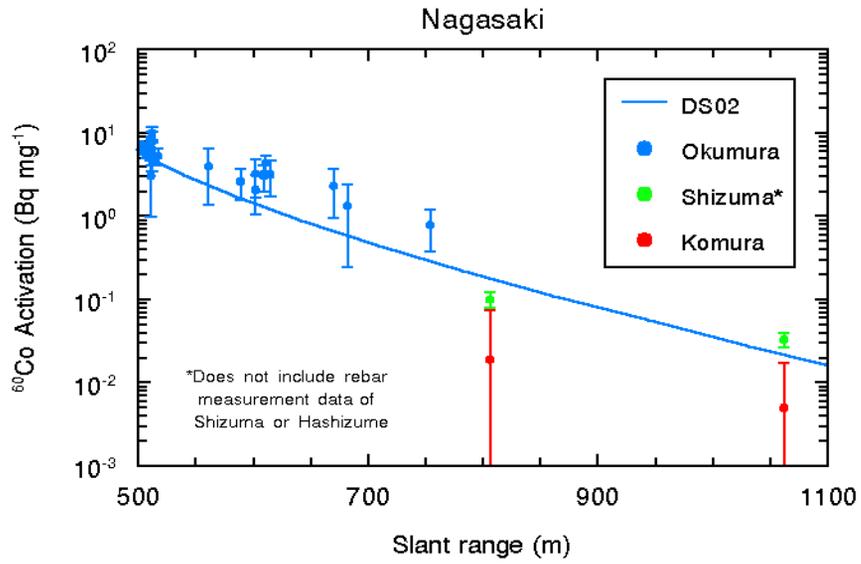
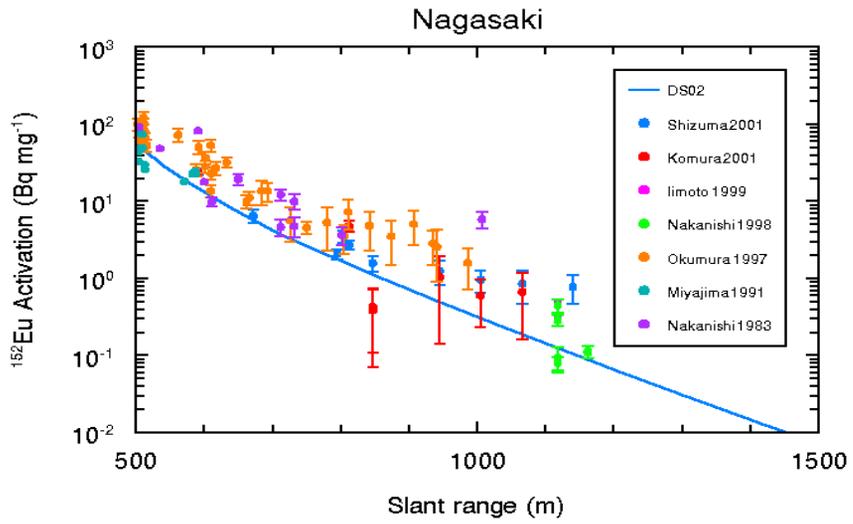
### Hiroshima 36Cl



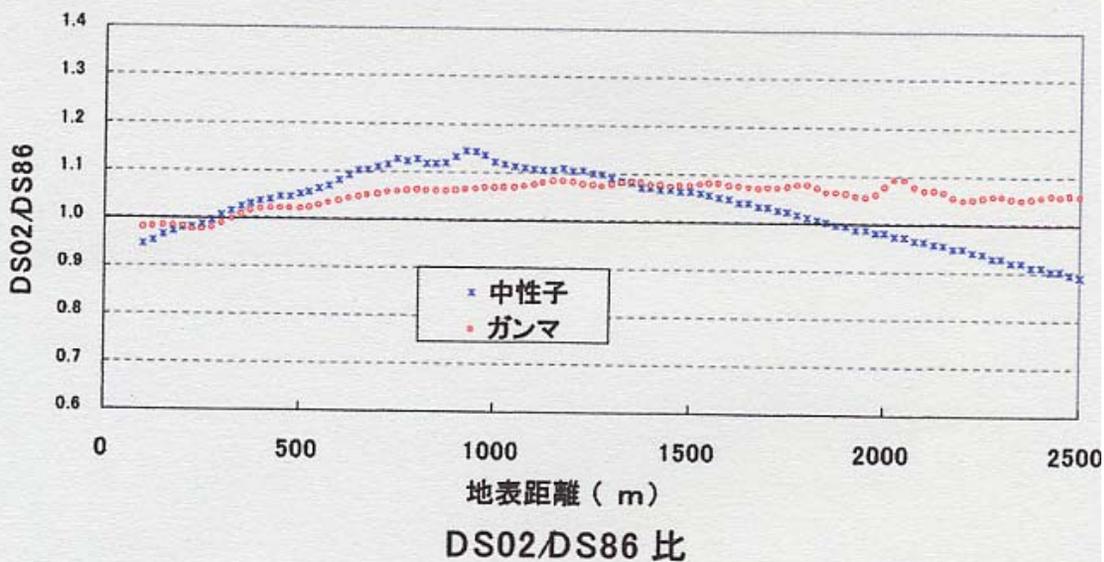
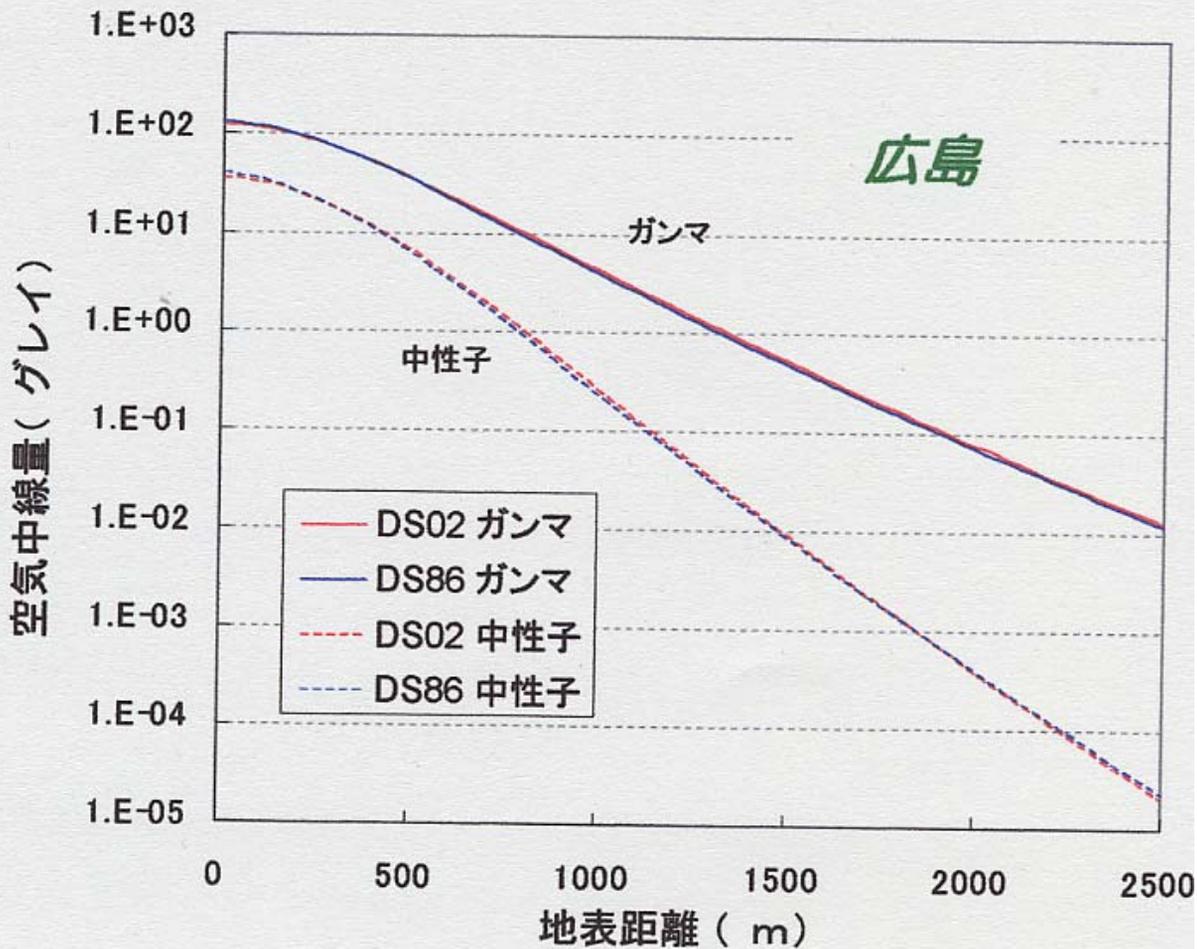
# 16kt、600m、モデル計算 (2003,1)



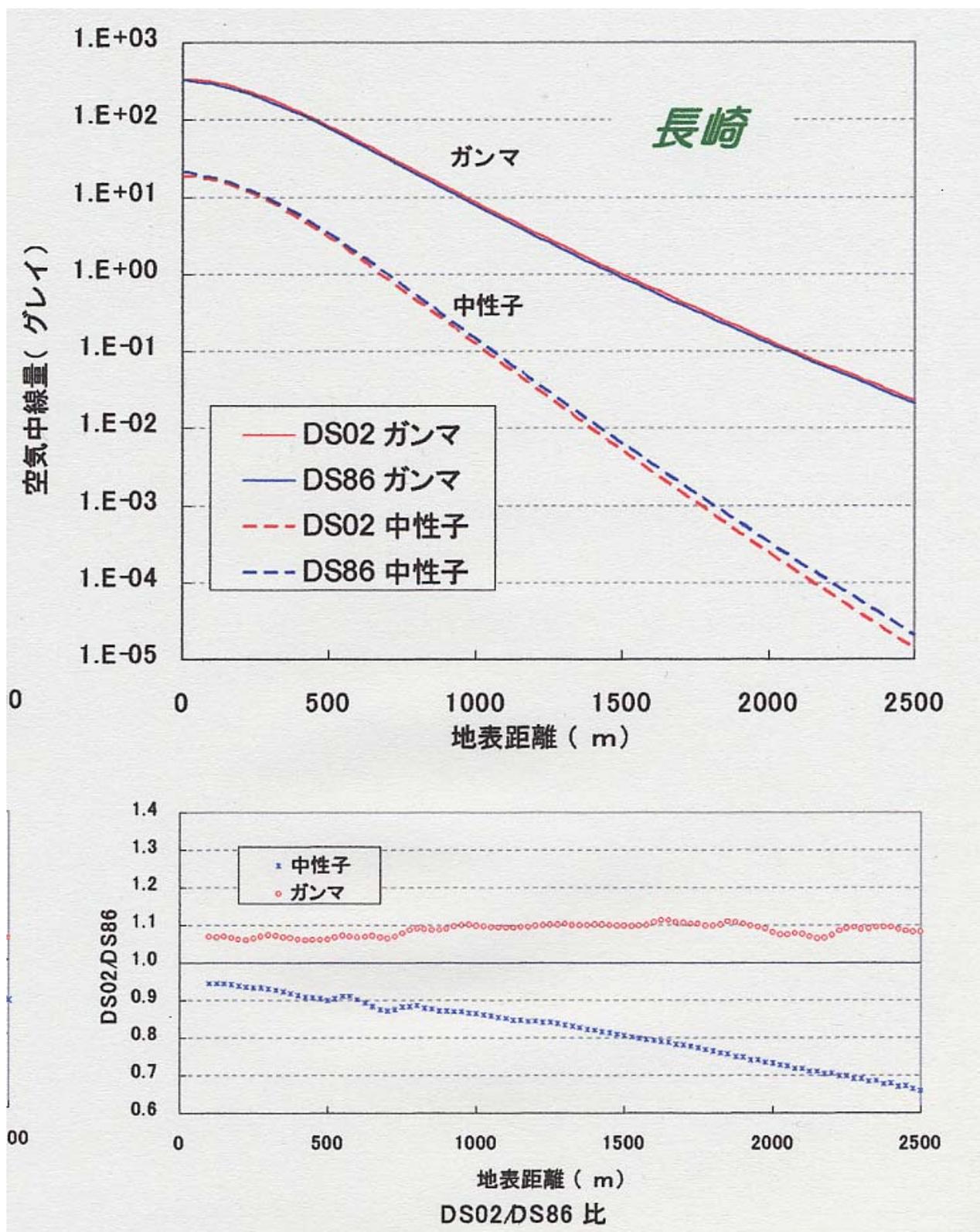
# 長崎



# DS86とDS02の比較



# DS86とDS02の比較

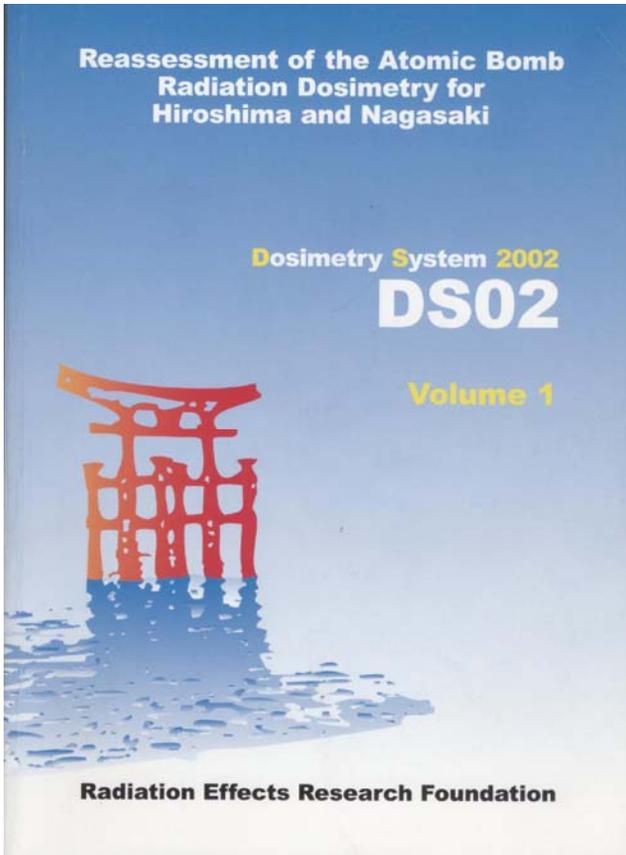


## 中性子線量評価のまとめ (DS86 → DS02)

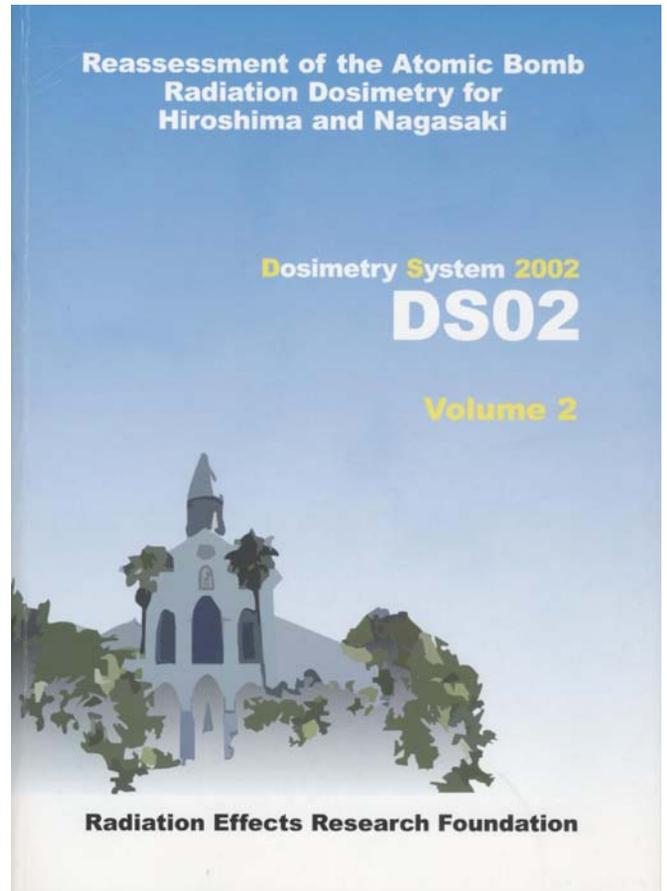
- ① 広島・長崎の熱中性子誘導放射能 ( $^{152}\text{Eu}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ ) に加えて、速中性子誘導放射能  $^{63}\text{Ni}$  の測定データが加えられた。
- ② 原爆ソースターム、原爆出力、爆発高度、中性子断面積、輸送計算などが詳細に見直された。
- ③ 放射化の計算値と残留放射能測定値とはほどほどに合っている。
- ④ 原爆線量のDS86からの変更は800-1500mの距離において以下の程度となる。

広島	n : 10-15%増	$\gamma$ : ~10%増
長崎	n : 10-20%減	$\gamma$ : ~10%増

# 2006年発行 DS02



(Vol.1)



(Vol.2)



## 2. 線量評価に追加すべき知見

### (1) 初期放射線

新しい知見は特になし

中性子放射化による残留放射能測定  
データとDS02中性子線量計算値に違い  
があれば爆発モデルの検討が必要

## (2) 誘導放射線

◆ DS86の誘導放射能の計算は広島、長崎の土壌についての計算である。実際には建物の鉄筋、レンガ、タイル、電車の軌道、敷石などがあり、一般的な土壌とはいえない。

### 資料2-1 今中計算

(文献:京大原子炉専門研究会「広島長崎原爆放射線量新評価システムDS02に関する専門研究会」KURRI-KR-114、2004)

### 資料2-2 Aさんの入市経路

(B報道機関提供の資料をもとに静間が作成した)

### 資料2-3 Aさんの被曝線量

(今中氏の作成した被曝線量計算ソフトに静間が入力した)

### 資料2-4 被爆後の広島・長崎の写真

●DS02に基づき、外部被曝線量を計算すると18.6cGyであり、被曝線量は小さい。実際にはβ線による被曝、飲み水や呼吸を通しての内部被曝も考慮する必要がある。

●土の場合:[直後]  $^{28}\text{Al}$ (2.2m)、[30m後]  $^{56}\text{Mn}$ (2.6 h)  
 $^{24}\text{Na}$ (15h)、[1週間後]  $^{59}\text{Fe}$ (44d)、 $^{46}\text{Sc}$ (83d)

●鉄の場合: $^{56}\text{Mn}$ (2.6 h)、 $^{59}\text{Fe}$ (44d)、 $^{60}\text{Co}$ (5.2y)  
( $^{56}\text{Mn}$ からの寄与が大きくなる)

◆ DS86では誘導放射能による被曝の計算はガンマ線についてのみである。ベータ線の影響も考慮する必要がある。

→ 田中論文(原医研、発表準備中)

資料2-5'「広島原爆の放射化土壌による $\beta$ 線、及び $\gamma$ 線皮膚線量の評価」(田中憲一他、日本原子力学会中国四国支部第一回研究発表会、2009年9月)

- 入市被爆者の脱毛が放射線によるものかについて調べるために放射化した地面からの $\beta$ 線、 $\gamma$ 線による被ばくと放射化した土壌が皮膚に付着した場合について評価した。
- 結果は地面から1mで0.84Gyであり、このうち地面からの $\gamma$ 線が99%で、皮膚についた土壌の $\beta$ 線が1%の割合であった。地面から2.5cmの高さでは15%程度増加する。
- 付着土壌の厚さや、内部被ばくについても評価が必要である。

# (3) 放射性降下物

## ◆核分裂生成物の降下範囲と降下物

資料2-5 「黒い雨」にともなう積算線量(静岡)

(文献:京大原子炉専門研究会「広島長崎原爆放射線量新評価システムDS02に関する専門研究会」KURRI-KR-114、2004)

資料2-6 被爆資料の写真(広島大理学部岩石学教室資料)

資料2-7 被爆資料の写真(仁科芳雄博士により集められた資料)

資料2-7'「広島原爆黒い雨の中のU-235/U-238比」(藤川)

(文献:京大原子炉専門研究会「広島長崎原爆放射線量新評価システムDS02に関する専門研究会」KURRI-KR-114、2004)

- 現行の「審査の方針」では「放射性降下物による被曝線量」は「己斐又は高須(広島)、西山4丁目または木場(長崎)に長期に居住した場合」とされている。核分裂ファールアウトの降下範囲は宇田雨域より広範囲であり、増田雨域に近かったと考えられる。このことは、旧広島市内で被爆から3日後に集められた仁科資料の測定から確認されている。
- 「黒い雨」には核分裂フォールアウトだけでなく、核分裂を起さなかったウラン(広島)が含まれていた。このことは原爆資料館に展示されている壁面の分析から確認された。長崎でも同様に未分裂のプルトニウムが含まれていた。

## ◆黒い雨に関する専門家会議のシミュレーション

資料2-8 「広島原爆の黒い雨による残留放射能と被ばく線量」(丸山、吉川) (文献:京大原子炉専門研究会「広島長崎原爆放射線量新評価システムDS02 に関する専門研究会」KURRI-KR-114、2004)

●昭和63年(1988年)8月に広島県・市に「黒い雨に関する専門家会議」が設置されて、黒い雨に関する実態とその雨に含まれていた放射能による人体への影響について科学的・合理的に解明するための方法の有無、及びその有効性についての検討がなされた。

・気象シミュレーションについての報告が丸山隆司(放医研)、吉川友章(気象研)により行われた。

原子雲:4000~8000m上空。火球が上昇して形成。核分裂生成物を含む。

衝撃塵:4000m以下。衝撃波が地上に達して反射し、放射化した地上の土砂を巻き上げた。

火災煙:最も低い雲。地上の火災により、時間をかけて上空に立ち昇った。木材には $^{24}\text{Na}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ が含まれる。

・各雲に含まれる粒径ごとに降下範囲のシミュレーションが行われ、また、放射能の降下量が推定された。

原子雲は雨となって一部が北西方向に降下した。

衝撃塵は雨として北に、塵として北西方向に広がった。

火災煙は黒い雨として北に、塵として北東に降下した。<sup>35</sup>

## ◆ $\beta$ 線による被曝

資料2-9 Barss、Weitzの論文 (Heath Phys.2006)

資料2-10 National Academies

([http://dels.nas.edu/dels/rpt\\_briefs/dtra\\_final.pdf](http://dels.nas.edu/dels/rpt_briefs/dtra_final.pdf))

### ● 米国における核実験に従事した退役軍人の被曝認定

資料2-10によれば、ネバダ、太平洋で1945年～1962年に核実験演習に参加した退役軍人、広島・長崎で捕虜となっていた兵士、広島・長崎に駐留した兵士の数は100,000人である。法律では21種のガンになった人は被曝線量に係わらず、補償の認定適格となる。

1980年ころから退役軍人に放射線による病気がではじめた。DTRAは原爆による被曝線量についての担当部署であり、実際の線量計算はSAICが行った。2000年に検討委員会が作られて1～14の結論を出した。

(抜粋)

- 2)  $\gamma$  線による外部線量上限値の見積もりは過小評価である。
  - 3) 中性子の被曝上限値は3～5倍過小評価である。
  - 4)  $\beta$  線による皮膚と眼の線量は信頼性がない。放射性粒子による皮膚線量は考慮されていない。
  - 5) 内部被曝の推定方法にはエラーとなる仮定が多く含まれている。
- 9、10、11)

退役軍人とのコミュニケーションをもっと持つべき。  
線量について詳しく伝え、病気とのリスクについて説明すべき。

## ● $\beta$ 線の皮膚と眼に与える被曝線量について

資料2-9 Barss、Weitz (SAIC)の論文 (Heath Phys.2006)によれば核実験演習に参加した退役軍人の  $\beta$  線、荷電粒子による皮膚および眼の被曝線量の計算が行われている。

### [方法]

- ・地表に  $\beta$  粒子を放出する線源を置く(核分裂片と中性子放射化放射能)
- ・地上1cmから2mまでの高さについて皮膚70  $\mu$ mを通過したあとの1  $\mu$ mのアクティブな細胞に与える線量を計算
- ・爆発から30分から2年後まで
- ・衣服は28mg/cm<sup>2</sup>として遮へい効果を調べた。
- ・眼については1cm厚さの水に置き換えて0.3cmの組織の線量を求めた。

### [結論]

- ・核分裂生成物が皮膚に与える染料の  $\beta/\gamma$  比  
(例) 1日後で1cmの高さでは64、1mで13、2mで5.4であり、 $\beta$  線の与える線量は  $\gamma$  線の数十倍高い。
- ・衣服による遮へい効果により10~30%減少する。
- ・中性子放射化土壌の  $\beta/\gamma$  比は  
(例) 1日後で1cmの高さで0.168、1mで0.07  
 $\beta$  線の寄与は小さい。

## (4) 内部被曝

### ◆セミパラチンスクの調査

資料2-11 旧ソ連核実験場セミパラチンスク近郊の被爆線量再構築と健康影響調査

(広島大学、星 正治、科研費(国際協同研究)報告書平成9-10)

- ・1949年 セミパラチンスクから150km離れたところに核実験場建設
- ・1949-1989  
大気中 87回、地上 26回、地下 346回
- ・8地区について住民の外部線量、内部線量を評価
- ・外部線量：（レンガの熱ルミネッセンス測定？）
- ・内部線量：食物、水などの摂取から
- ・結果はTable 1. 5  
外部線量と内部線量は同程度の値を示している。

# まとめ

1. 誘導放射能は一様な土壌についての計算であるが、実際には周囲の状況により異なる。入市者の行動経路にそった状況を考慮に入れることと、誘導放射能の $\beta$ 線からの被曝も考慮する必要がある。
2. 放射性降下物の降下範囲は宇田雨域よりも広いことは実測データから確認されている。
3. 放射性降下物の $\beta$ 線による被曝はこれまで考慮されていないが、最近のSAICの研究から $\beta$ 線の被曝は $\gamma$ 線の数十倍あることが示唆された。
4. 内部被曝の評価はこれまで行われていないが、セミパラチンスクの調査結果から、外部被曝と同程度あることが示唆されている。広島・長崎においても参考データとなる。