

地球規模フォールアウト⁹⁰Srの降下と食品経由の人体移行特性

GLOBAL FALLOUT OF RADIOACTIVE ⁹⁰Sr AND THEIR DIETARY INTAKE

森澤真輔*、山並憲正*、井上頼輝*

Shinsuke MORISAWA*, Norimasa YAMANAMI* and Yoriteru INOUE*

ABSTRACT; Japanese foods depend largely on foreign countries and domestic food supply is now no more than 30 percents if feedstuffs for livestock are included. Therefore not only ecological /natural but also social, e.g. human activities related, transportation of fallout ⁹⁰Sr are to be taken into accounts for estimation of baseline internal irradiation dose and potential health risks of Japanese peoples through dietary intake of ⁹⁰Sr. Mathematical model is developed and examined for practical application on estimating Japanese dietary intake level of fallout ⁹⁰Sr for past 30 years.

The main results obtained in this study under the limited assumptions are as follows:

- (1) The proposed model is promising for evaluating the Japanese baseline dietary intake of global radioactive fallout ⁹⁰Sr.
- (2) Japanese dietary intake of ⁹⁰Sr depends mainly on vegetable foods. Almost 60 % of Japanese dietary ⁹⁰Sr intake is now fed from foreign countries through foods import.
- (3) Direct deposition coefficient of ⁹⁰Sr on agricultural plants is highly sensitive to the dietary intake for high deposition periods of fallout ⁹⁰Sr, and environmental decay coefficient is for low deposition periods. Transfer factor of ⁹⁰Sr through root uptake is sensitive for both periods.

KEYWORDS; Fallout ⁹⁰Sr, Dietary intake, Food contamination, Internal radiation, Health risk

1. はじめに

微量有害物質による環境汚染は、低濃度長期曝露の形態をとって、人およびその集団に悪影響をもたらす。人の一生を見通す時間スケールでこれらの悪影響を評価するためには、食糧の輸出入等、人間の経済社会活動に付随する有害物質の輸送を視野に修めた検討が必要である。

わが国の飼料用穀物を含めた穀物自給率は現在30%にすぎず、日本人の放射性核種の経口摂取量を評価するためには、地球の各地に降下した放射性フォールアウトが食糧と共にわが国へ人為的に輸送され、食品として食卓に供され、摂取される経路を無視することができない。ここでは、日本人の⁹⁰Sr経口摂取量の経年変動を把握するための数学モデルを構築し、地球規模モニタリングデータに照らしてモデルの妥当性を検証すると共に、輸入農産物や畜産物が⁹⁰Sr摂取量に及ぼす効果を含めて、日本人による⁹⁰Srのバックグラウンド摂取量を評価する手順と、その評価例について報告する。

* 京都大学工学部衛生工学教室 (Dept. of Environ. & Sanit. Eng., Kyoto Univrtcity)

2. 評価モデルの構成

評価対象期間を1960年～1990年の30年間とし、評価対象を日本人によるフォールアウト⁹⁰Srの経口摂取量とする。ただし、水産物摂取の経路については評価対象から除外する。ここでは日本人が摂取する食品を植物性食品と動物性食品とに分類し、別途家畜飼料についても検討した。

地球規模の⁹⁰Srの降下特性を評価するサブモデルでは、地球大気を成層圏と対流圏に、また地表付近の風系と気候ゾーンに注目して緯度別に8ゾーン（南北各60度、40度、10度および赤道で区分）に、かつ地表面を8ゾーンの陸圏と南北半球の水圏に区分し、各領域ごとに⁹⁰Srの存在量を従属変数にするコンパートメントモデル（常微分方程式群）で記述した。全体モデルの構成を Fig.1 に示す。

農作物・飼料用穀物（植物）中の⁹⁰Sr濃度はフォールアウト⁹⁰Srの直接沈着効果と経根吸収効果とを考慮して、次式により算定する。

$$p_{m,i}(t) = T F_m \cdot C_s(t) + k_m \cdot F_i(t)$$

ここに、 $p_{m,i}$ は第*i*ゾーンで収穫される第*m*農産物中の⁹⁰Sr濃度(Bq/kg)、 C_s は作土中の⁹⁰Sr濃度(Bq/kg)、 F_i は⁹⁰Srの降下率(Bq/m²・month)、 $T F_m$ は土壤中⁹⁰Sr濃度に対して農作物の種類*m*ごとに定義される⁹⁰Srの経根移行係数(-)、 k_m は⁹⁰Srの降下率に対して農作物の種類*m*ごとに定義される直接沈着係数(m²・month/kg)、*t*は時間である。

畜産物中の⁹⁰Sr濃度 q_n は、家畜の種類ごとに実測されている残留関数 $R_n(t)$ （-：*n*は家畜の種類）を用いて評価することにする。また、牛乳中の⁹⁰Sr濃度 q_n (Bq/l)は搾乳前3日間程度の期間の乳牛の⁹⁰Sr摂取率によって定まるとの知見と牛乳への移行率¹⁾とを用いて、

$$q_n(t) = 1.2 \times 10^{-2} \sum_m p_m(t) I_{n,m}(t)$$

で算定する。ここに、 $\sum_m$ は*m*についての和をとることを意味する。

農・畜産物および飼料用穀物等の輸出入は実績統計値を用い、輸入された農・畜産物と国内産農・畜産物とは市場において均質に混合するものとした。食品中の平均⁹⁰Sr濃度とその食品の摂取量との積を算定し、それらの和によって日本人の⁹⁰Sr経口摂取量とする。摂取食品中の平均⁹⁰Sr濃度は、食品摂取量により加重した各摂取食品中濃度の平均値で与えられる。

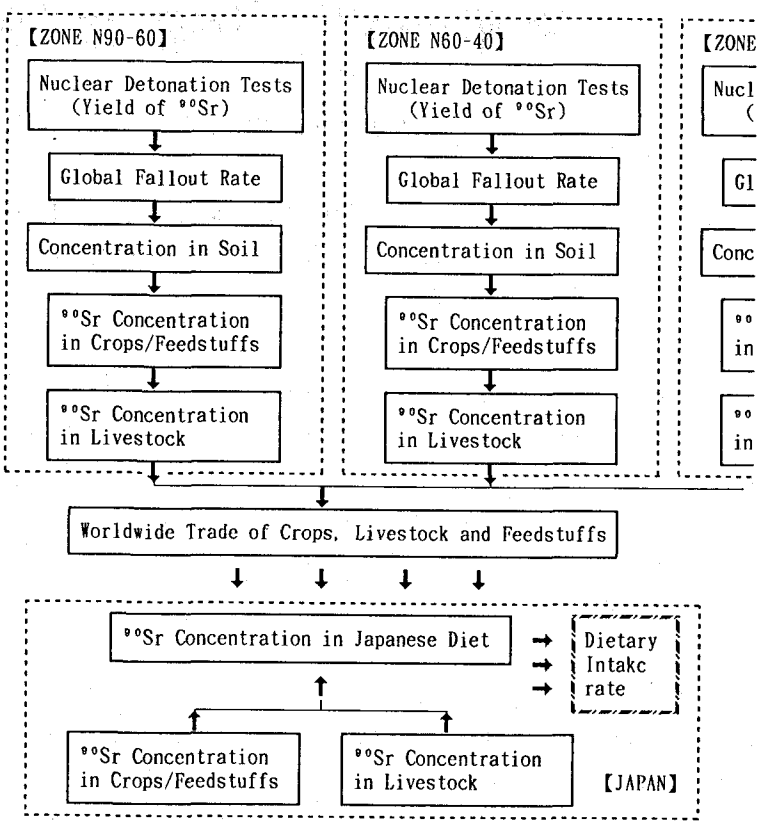


Figure 1 General Illustration of Total Model Used in This Study for Estimation of ⁹⁰Sr Dietary Intake by Japanese

3. 数値シミュレーション

3.1 入力データおよび初期・境界条件

^{90}Sr 動態の数値シミュレーションを実行するために必要な入力データは以下の通りである。まず、環境中への放射性 ^{90}Sr の供給（境界）条件を規定するために、核実験データ（年月日、場所、規模²⁾⁻⁴⁾を用いる。食糧の輸入に伴う ^{90}Sr の人為的輸送を評価するために、農・畜産物および家畜飼料の輸入実績データ並びに家畜飼料の組成データ⁵⁾⁻⁷⁾を用いる。

また、日本人の1人1日当たりの食品摂取量は、厚生省の国民栄養調査のデータ⁸⁾（全国平均の生重量）をそのまま用いた。各食品目別の輸入量と国内生産量との和に占める割合は、そのまま日本人の摂取量に占める割合に等しいと仮定した。

数値シミュレーションは1カ月単位に実行し、シミュレーションの初期条件としては1945年時点において、全環境構成要素中の ^{90}Sr 蓄積量（濃度）を0とした。

3.2 環境パラメータの設定

(A) 地球規模の ^{90}Sr 降下モデル

核実験の規模によって生成される ^{90}Sr の量（ $3.9 \times 10^{15} \text{ Bq/Mt}$ ）²⁾と成層圏および対流圏に分配される割合⁹⁾とが定まる。異なるゾーンの成層圏、対流圏相互間および成層圏と対流圏相互間の ^{90}Sr の交換速度係数 k_{ij} については、大気圏内での放射性物質の滞留時間等に関する調査報告を参照し、地球規模での ^{90}Sr の緯度別降下特性を評価するサブモデルによる数値シミュレーションを繰り返し、 ^{90}Sr 降下率の計算値がU.S. EMLによる実測値¹⁰⁾に一致するように決定した。

(B) 食糧中 ^{90}Sr 濃度評価モデル

^{90}Sr の土壌から農作物への経根移行を表す移行係数 TF_m の報告値の上限値と下限値¹¹⁾、およびそれらの相乗平均値（中央値）をTable 1に示す。シミュレーションには相乗平均値を用いることにした。直接沈着係数 k_m は、 ^{90}Sr の農作物表面への沈着、雨水等による洗浄、表面に沈着した ^{90}Sr の農作物内部への移行、葉菜類の洗浄・調理による ^{90}Sr の除去、等の効果を参照して、野菜類に対して $3 \times 10^{-2} (\text{m}^2 \cdot \text{month/kg})$ 、野菜類以外の全農作物に対して $4.5 \times 10^{-3} (\text{m}^2 \cdot \text{month/kg})$ とした。家畜に対する ^{90}Sr の残留関数¹⁾をTable 2に整理して示す。

(C) 食糧・食品の輸入、日本人の食品摂取

Table 1 Transfer Factor of Sr-90 from Surface Soil to Crops

Crops	Range	Transfer factor (-)		
		Lower limit	Median	Upper limit
Rice		0.006	0.012	0.024
Wheats		0.07	0.14	0.28
Potatoes		0.005	0.01	0.02
Vegetables		0.04	0.08	0.16
Fruits		0.002	0.004	0.008
Beans		0.032	0.063	0.13

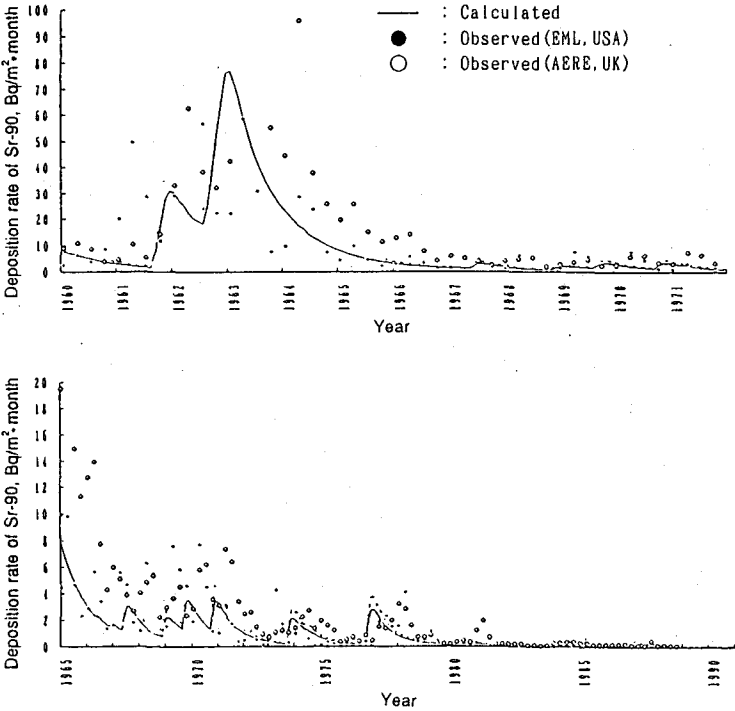


Figure 2 Comparison of the Observed Fallout ^{90}Sr Deposition with the Calculated for the N40-60 Zone

食糧・食品の輸入および日本人が摂取する食品の構成については、既に述べたように、実績統計データを用いる。

3.3 モデルの検証

(A) ⁹⁰Sr 降下率

⁹⁰Sr 降下率のシミュレーション結果の一部を、英国AERE¹²⁾ および南アフリカ共和国¹³⁾ による実測値と共に Fig. 2 に示す。実測値と計算値とは比較的よく一致しているといえる。

(B) 経口⁹⁰Sr 摂取量

日本人が摂取する食品が生産される国および生産地域の緯度帯を特定し、⁹⁰Sr の輸入量と経口摂取量とを評価した。日本人によるフォールアウト⁹⁰Sr 経口摂取量のシミュレーション結果を放射線医学総合研究所(NIRS) による実測値¹⁴⁾ と共に Fig. 3 に示す。日本人による⁹⁰Sr の経口摂取量のモデルによる計算値は、実測値とよく一致した。

3.4 シミュレーション結果

(A) 耕作土壌中⁹⁰Sr 濃度

耕作土壌中の⁹⁰Sr 濃度の計算結果の一部を、小麦の耕作土壌を対象に、各緯度ゾーン別に Fig. 4 に示す。土壌中の⁹⁰Sr 濃度は1965年をピークにその後は徐々に減少している。⁹⁰Sr 降下率が1970年を過ぎると急激に減少するにもかかわらず土壌中の⁹⁰Sr 濃度が減少しないのは、⁹⁰Sr が土壌によく吸着保持されるためである。

(B) 日本人が食品から摂取する⁹⁰Sr 量

日本人による⁹⁰Sr 経口摂取量の経年変化を Fig. 5 に示す。⁹⁰Sr 経口摂取量の大部分は植物性食品と共に摂取されており、植物性食品の内では野菜類および小麦類の寄与が大きい。一方、動物性食品からの⁹⁰Sr 摂取においては乳製品の寄与が支配的である。

日本人による⁹⁰Sr の摂取量は、生産域では北半球特に北緯

Table 2 Retention Function of Sr-90 for Each Livestock and Human Bone

Livestock	Retention function used in this study
Layer, Pig Chicken, Beaf cattle, Dairy cattle	$R=0.37\exp(-1.42t)+0.46\exp(-1.39t)+0.045\exp(-0.035t)+0.055\exp(-0.001t)$
Eggs	$R=0.08\exp(-0.46t)+0.008\exp(-0.041t)$

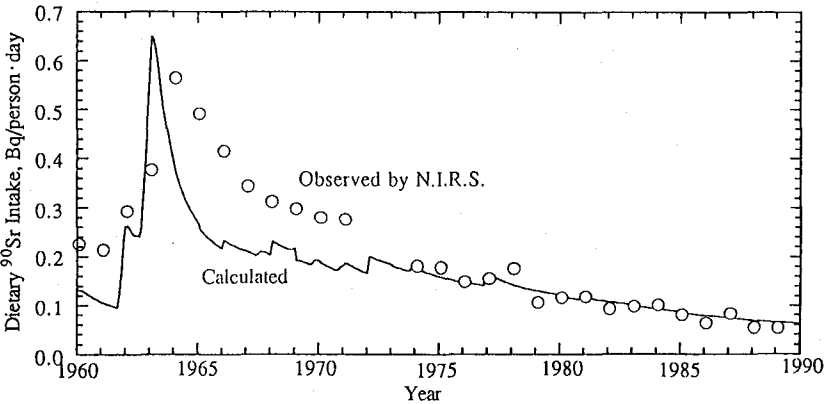


Figure 3 Comparison of the Observed Japanese ⁹⁰Sr Dietary Intake with the Calculated

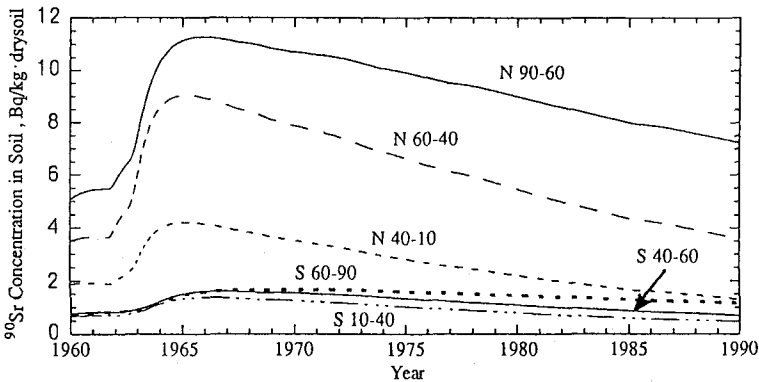


Figure 4 Calculated ⁹⁰Sr Concentration in Soil for Wheats Cultivation in Each Zone

40～60度ゾーンの寄与が大きい。この緯度ゾーンでの ^{90}Sr 降下量が大きく、また飼料用を含めこの緯度ゾーンで生産された農産物が、多量に輸入され消費されているためである。 ^{90}Sr のほぼ全量が北緯10～60度域から供給されている。1989年12月において、日本に降下した ^{90}Sr が日本人の ^{90}Sr 摂取量に占める割合は37%であり、他は外国に降下した ^{90}Sr である。

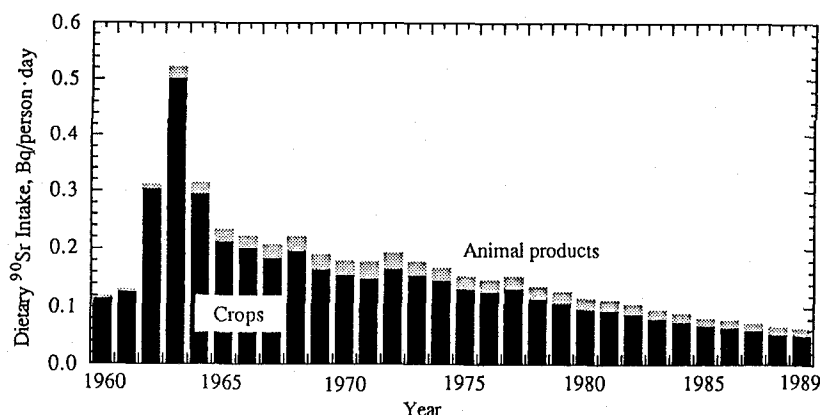


Figure 5 Dietary Intake of ^{90}Sr through Foods

4. 考察

4.1 評価モデルの特色

本研究で構築した数学モデルは、家畜および人体内での ^{90}Sr 代謝を残留関数（指数関数）で評価した点を除けば、ほぼ線形のモデルになっている。モデルの構築に際しては、環境構成要素中での ^{90}Sr の存在量を直接の従属変数とし、環境構成要素中の ^{90}Sr 濃度は存在量から間接的に計算する方式を採用した。人およびその集団に対する長期的な影響を評価するためには、地球環境に負荷された ^{90}Sr の究極的な移行と分配とを物質収支関係に留意して把握する必要があるからである。

本研究が評価対象に設定した領域へ、 ^{90}Sr は核実験によって供給される。領域からの逸失は、 ^{90}Sr の深地層への浸透（環境減衰）と放射性崩壊とによって行われる。 ^{90}Sr の降下率、耕作土壤中濃度、経口摂取量および人骨中濃度の実測値とモデルによる計算値とが良好に一致したことから、パラメータや評価すべき ^{90}Sr の移行経路の吟味等、なを検討を要する事項が残されているものの、食品の摂取を通じて地球規模で降下する ^{90}Sr に日本人が如何に曝露されているかを評価するためのモデルを得ることができたといえよう。

4.2 パラメータ感度解析

経根移行係数、直接沈着係数および環境減衰速度係数が、全食品からの ^{90}Sr 経口摂取量に及ぼす影響（感度）について検討した。農作物の移行係数として Table 1 に示した中央値（標準値）、上限値、下限値を用いて ^{90}Sr の経口摂取量を算定した結果、移行係数の上限値（Fig.6 鎖線）と下限値（同破線）を用いる場合の経口摂取量の評価結果（Fig.6 参照）には、評価対象にした全期間にわたり、かなりの差が生じたが、経口摂取量の実測値のほとんどが、経根移行係数の上限値および下限値に対応する両曲線に挟まれる領域の内部に存在した。

経根移行係数の感度は ^{90}Sr

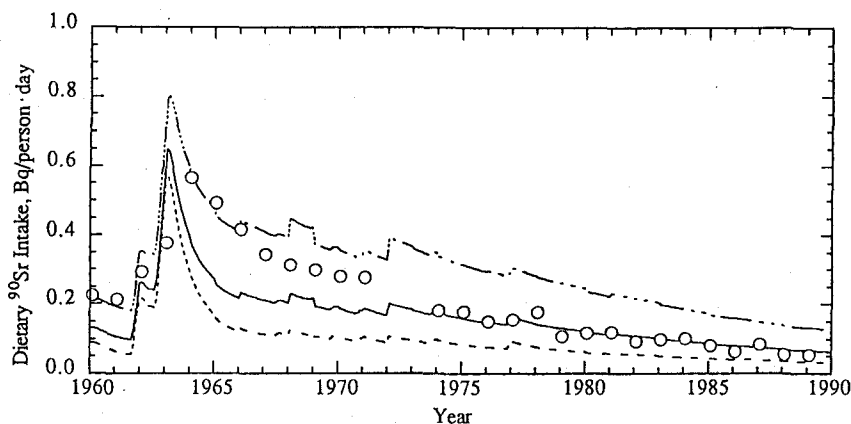


Figure 6 Parameter(Transfer Factor) Sensitivity Analysis for Dietary Intake of ^{90}Sr

の降下量が少ない期間に大きく、降下量が多い期間では小さい。降下率が大きい期間の ^{90}Sr 経口摂取量をより正確に評価するためには、特に葉菜類についての直接沈着係数をさらに詳しく考察することが効果的である。一方、直接沈着係数とは逆に、環境減衰速度係数は、 ^{90}Sr の降下率が大きい1960年代前半では感度が小さく、 ^{90}Sr 降下率が小さくなるにつれ感度が大きくなる。すなわち、降下率が小さい期間の ^{90}Sr 経口摂取量をより正確に評価するためには、環境減衰速度係数をさらに詳しく考察することが効果的である。

5. 結論

本研究で得られた主要な結論を要約すると以下のようになる。

- ①地球規模での ^{90}Sr の降下特性とその日本人による経口摂取の概要を把握するモデルが構築され、検証されたといえる。
- ②日本人による ^{90}Sr 経口摂取量は主として農作物の摂取に支配されている。
- ③最近では、日本人が経口摂取する ^{90}Sr のほぼ60%は食糧・食品の輸入に付随して外国から人為的に輸送されている。
- ④直接沈着係数は ^{90}Sr 降下率が大きい期間に、環境減衰速度係数は降下率が小さい期間に、また経根移行係数はいずれの期間にも、 ^{90}Sr 経口摂取量に大きな影響を及ぼす。

本研究の推進に協力を賜った島田洋子、浜口敬三の両氏に感謝申し上げます。本研究の計算には京都大学大型計算機センターのFACOM M1800を使用しました。

参考文献

- 1) P. J. COUGHTREY & M. C. THORNE: Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial and Aquatic Ecosystems, A Critical Review of Data, (1983)
- 2) 佐伯誠道編著: 環境放射能、ソフトサイエンス社、(1984)
- 3) 日本原子力産業会議編: 原子力年表、各年度版、(1934~1985)
- 4) 市川龍資: チェルノブイリ原発事故に関するIAEA専門家会議、保健物理、Vol. 21、pp325~329、(1986)
- 5) 農林水産省畜産局流通飼料課監修: 飼料便覧、農林統計協会、(1976、1982、1986、1991)
- 6) 日本貿易振興会編: 輸入農林水産物の現況、(1961、1966)
- 7) 日本貿易振興会編: 農林水産物の貿易、(1971、1976、1981、1986、1991)
- 8) 厚生省: 国民栄養調査、(1969~990)
- 9) 葛城幸雄: 死の灰のゆくえ、新草出版、(1986)
- 10) Z. R. Juzdan: Worldwide Deposition of Sr-90 through 1985, Environmental Measurement Laboratory, USDOE, EML-515, (1988)
- 11) 原子力環境整備センター: 土壌から農作物への放射性物質の移行係数(環境 $^{\circ}\text{ラメ-タリ-ズ}^{\circ}1$)、(1988)
- 12) R. S. Cambray et als.: Radioactive Fallout in Air and Rain, Results to the end of 1988, AERE-R-13575, DOE/RW/90/031, (1989)
- 13) C. A. R. Bain et als.: Environmental Radioactivity at the National Nuclear Research Center, Pelindaba, PER-162, (1987)
- 14) National Institute of Radiological Sciences: Environmental Materials, Radioactivity Survey Data in Japan, No. 1~No. 95、(1963~1991)