

3 環境理学課

石炭燃焼に伴う放射能の影響

環境理学課 中島英男

1 はじめに

近年、エネルギー利用の多様化に伴って、エネルギー源としての石炭の利用が見直されてきた。日本各地において、大規模な石炭火力発電所の建設が予定されている。

石炭中には、天然のウラン系・トリウム系・アクチニウム系及び ^{40}K の放射性核種を含有している。これが燃焼されると、ばいじんとして自然環境へ放出される。

そこで、石炭中の放射能を測定しその実測値を基にして、自然環境への放射能の放出量及び最大年平均濃度地点における個人被ばく線量の推定を試みた。

2 石炭中の放射能

測定はGe(Li)による γ 線分析による。

表1にその測定結果を示す。

表1の値は、石炭中の ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{235}U の崩

壊系列の娘核種を永続平衡状態にあると仮定している。 ^{235}U は天然存在比0.7%として計算している。

対象となる核種は、ICRP(国際放射線防護委員会) Publication 2の不溶性物質による肺被ばくに対する最大許容空气中濃度の数値が小さく、かつある程度長い半減期をもつ核種とする。

^{238}U 、 ^{234}U 、 ^{230}Th 、 ^{222}Rn の数値は ^{226}Ra の実測値、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po は ^{214}Pb の実測値、 ^{232}Th 、 ^{228}Ra 、 ^{228}Th 、 ^{224}Ra は ^{228}Ac の実測値、また ^{231}Pa 、 ^{227}Ac は ^{235}U の計算値からそれぞれ推定した。

表1から石炭中の放射能は、採取地点によってかなり異なる。

4) GLUSKOTERらの測定結果によると、同一地点で採取しても石炭層の違いによって放射能が約1桁も変動している。

石炭・土壌・岩石中の放射能の比較を下表に示す。

試料	^{238}U			^{232}Th			^{40}K		
	Min	Max	Ave	Min	Max	Ave	Min	Max	Ave
米 国 炭	0.036	14 229	0 576	0 069	8 761	0 496	0 067	20 099	1 424
土 壌	0 298	1 324	0 596	0 222	1 331	0 665	1 005	20 936	10 887
岩 石	0 165	1 665	0 893	0 177	2 218	1 065	2 512	41 872	17 586

※単位: pci/g

米 国 炭 の 試 料 数 910

文 献 科 学 1981年1月号

3 焼却灰及び煙突から放出される灰中の放射能の推定値

表2に焼却灰中の放射能を示す。灰分%は実測値である。

焼却灰中の放射能 (pci/g) = 石炭中の放射能 (pci/g) × 100 ÷ 灰分(%)として求めた。

表3に放出灰中の放射能を示す。

この表のデータでは、次のような仮定をした。

煙突から放出される灰は、非常に粒子径が小さく(大部分は1ミクロン以下)、ガス状放射性核種から生成される娘核種及び揮発性放射性核種を濃縮する効果がある。¹⁾

文献1)では、その濃縮効果を次のように仮定している。

濃縮効果 U: 2倍 Ra: 1.5倍
²¹⁰Pb, ²¹⁰Po: 5倍 その他の核種: 1

表3のデータは、濃縮効果を考慮に入れた放出灰中の放射能の推定値である。

4 放射能の年間放出量の推定値

推定値の計算には、文献5)のパラメータを用いた。

発電所の概要は、次のとおりである。

電気出力	石炭の年間使用量	操業率	ばいじん量	備考
70万kW	160万t	70%	111 Kg/hr	2基
100万kW	225万t	70%	152 Kg/hr	2基

4基稼働時の電気出力は340万kWになる。

ばいじん量は、最大連続負荷時(定格連続負荷時×1.05)の値である。

前記のパラメータを使用して、生成された焼却灰のうち煙突から放出される灰の割合を計算すると次のようになる。

定格時年間発生ばいじん量 = (111 × 2 + 152 × 2) × 365 × 24 × 0.7 ÷ 1.05 = 0.307(万t)

石炭の年間使用量 = 160 × 2 + 225 × 2
 = 770(万t)

年間発生焼却灰量 = 770 × 0.2 = 154(万t)

ただし灰分%を20%とする。

放出灰の割合 = $\frac{0.307}{154} \times 100 = 0.2(\%)$ となる。

年間放出量は、表3の放出灰中の放射能と年間総放出灰量から求められる。例えば、中国炭(淮北)の²³⁸Uの年間放出量は次のようになる。

770(万t) × 0.193 × 0.002 = 2.9722 × 10⁹
 (g/年) : 年間総放出灰量

6.944 (pci/g) × 2.9722 × 10⁹ (g/年)
 = 20.64 (mci/年)

ただし、0.193は実測の灰化率である。

計算結果をまとめたものを表4に示す。

表中²²²Rn(ラドン)ガスは、気体なので100%放出されるものと仮定した。

5 最大年平均濃度地点における空气中放射能の推定値

推定値の計算には、前記と同様に文献5)のパラメータを用いた。

ばいじんの拡散をSO₂、NO_xと同じと仮定する。

長期拡散予測によると、SO₂の最大年平均濃度地点は、発電所から南南東約5kmである。

また、SO₂の排出濃度100ppmとすると最大年平均濃度は0.00035ppmとなっている。

ばいじんの年間平均稀釈率を $\frac{0.00035}{100} = 3.5 \times 10^{-6}$ とする。

定格時での年間排出ガス量(乾ガス)は、次のようになる。

11.706 × 10³ (Nm³/hr) × $\frac{1}{1.05} \times (1 - 0.1) \times 24 \times 365 \times 0.7 \times \frac{288}{273} = 6.491 \times 10^{10}$ (m³/年)

※水分量10%、操業率70%、大気温度15℃とする。

例えば、中国炭(淮北)の²³⁸Uの地表付近での空气中放射能濃度は次のようになる。

$$20.64 \text{ (mci/年)} \times \frac{1}{6.491 \times 10^{10}} \times 3.5 \times 10^{-6} \times 10^{15} = 1.113 \text{ (aci/m}^3\text{)}$$

$$\ast 1 \text{ aci} = 10^{-18} \text{ ci}$$

計算結果をまとめたものを表5に示す。

自然環境においては、土壌に含まれるウラン系放射性物質から²²²Rn(ラドン)が約50 aci/cm³環境中に放出されている。空気中の自然バックグランド放射能としては²²²Rnが約10⁸ aci/m³存在し、また、²¹⁰Pbで10⁴~2×10⁴ aci/m³、²¹⁰Poで10³~2×10³ aci/m³となっている。⁶⁾

この3核種以外の表中の自然放射能(自然バックグランド放射能)は、土壌の放射能²⁾と塵埃含有量0.1 mg/m³を仮定して計算した。⁶⁾

石炭燃焼による空气中放射能の増加量は非常に少なく、その上自然放射能よりはるかに低い値となっている。また、自然放射能の変動は非常に大きいので、石炭燃焼による放射能の増加分を検出することは、非常に困難である。

6 土壌の放射能蓄積量の推定値

浮遊物質の沈着速度は、沈着物質の性質(粒径の大きさ等)・気象条件・被沈着物の状態(地表面の状態等)・降水等によって変動する。

ここでは沈着速度を1(cm/s)と仮定する¹⁾³⁾。

沈着速度は、次のように定義される。

$$\text{沈着速度(cm/s)} =$$

$$\frac{\text{沈着面上の単位面積に対する沈着率(aci/cm}^2\text{・s)}}{\text{空气中の放射能濃度(aci/cm}^3\text{)}}$$

例えば、中国炭(淮北)の²³⁸Uの放射能蓄積量は次のようになる。

$$1 \text{ (cm/s)} \times 1.113 \text{ (aci/m}^3\text{)} \times 10^{-6} \times 10^{10} \times 365 \times 24 \times 3600 \times 10^{-15} = 3.510 \times 10^{-4} \text{ (mci/km}^2\text{・年)}$$

計算結果をまとめたものを表6に示す。

表中の全蓄積量及び土壌の放射能増加量の計算値は南アフリカ炭を50年間使用したときの値である。

放射能増加量の計算では、土壌の比重を1.3

(g/cm³)¹¹⁾とし、放射性物質が地表面2cm以内に含まれるとした。

土壌の放射能増加量は非常に少なく、土壌の自然放射能²⁾と比較してもはるかに小さい。このため、放射能の増加分を検出することは非常に困難である。

7 最大年平均濃度地点における個人被ばく線量の推定値

石炭燃焼によって発生する放出灰の性質は、大部分が1ミクロン以下の粒子で、不溶なアルミナ・シリケート系のガラス基盤から成り⁸⁾溶解度に関しては全く溶けないか、または7%以下の溶解度⁹⁾¹⁰⁾とされている。

このことから、決定経路としては空气中の放出灰を吸入する経路とし、また、決定臓器としては不溶性灰による肺被ばくとする。

付着や汚染土壌からの放射性物質の食物へのとり込みを経由した経口摂取による被ばくは、表6の地表面への蓄積放射能が非常に少ないので無視できる。

また、同様に地表面上の放射性物質からの外部被ばくも無視できる。

被ばく線量計算は、ICRP Publication 2の方法を用いた。

年間内部被ばく線量は、次式によって求める。

$$D = R \cdot \frac{C \times 365 \times 24}{(\text{MPC})_a^{168} \times 168}$$

D: 年間内部被ばく線量 (mrem/年)

C: 空气中放射能濃度 (μci/cm³)

R: 各器官に対する許容週線量 (mrem/週)

肺(不溶): 300 骨(可溶): 560

全身(可溶): 100

(MPC)_a¹⁶⁸: 週168時間に対する最大許容濃度 (μci/cm³)

被ばく線量計算には、次のような条件が付いて

いる。

(1) 1週間168時間で50年間にわたる連続摂取(被ばく)とする。

(2) 被ばく対象となる人間は、標準人(成人)である。かつ、個人の被ばく線量である。

(3) 体内で親核種から作られる娘核種の寄与分も含まれている。

(4) ^{222}Rn (ラドン)については、空气中で達せられる娘核種との平衡状態が考慮されている。

(5) 肺での粒子状物質の挙動に関する仮定。

表7にウラン系・トリウム系の空气中放射能が4種類の石炭のうち最も高い値となっている南アフリカ炭を使用した時の最大年平均濃度地点における個人被ばく線量の推定値を示す。

表中には、自然放射能による肺被ばく線量及び放出灰を可溶性と仮定した時の骨及び全身被ばく線量を参考データとして示す。

8 ま と め

永続平衡を仮定した石炭中の放射能、灰化率、放出灰の放出割合、濃縮効果、放出灰の粒径等の物理的性質及び化学的性質、放出灰の拡散に伴う年間平均希釈率、沈着速度、吸入による人体被ばく線量の各過程において計算上の誤差が含まれる。

しかし、各過程の誤差があるにしても、最終的な肺被ばく線量0.015ミリレム/年は、自然放射能による肺被ばく線量の約1万分の1、肺に対する線量限度1500ミリレム/年の10万分の1であり被ばく上問題となる量ではない。

また、土壌への蓄積放射能及び空气中の放射能の増加量は非常に少なく、放射能測定によってその増加分を検出することは非常に困難である。

なお、今後計算の各過程におけるパラメータのより精度の高い推定値の検討が必要である。

文 献

- 1) Harold L. Beck et al.: 石炭から出る放射能の影響(科学1981年1月号)
- 2) UNSCEAR: 国連科学委員会報告書(1977年)
- 3) 原子力委員会: 発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針(1976年)
- 4) H. J. Gluskoter et al.: Illinois State Geological Survey Circular 499(1977年)
- 5) 九州電力株式会社, 電源開発株式会社: 環境影響調査書(1980年)
- 6) NCRP: NCRP Report 145(1975年)
- 7) ICRP: ICRP Publication 2(1959年)
- 8) R. W. Linton et al.: Science, 191, 852(1976年)
- 9) P. H. Bedrosian et al.: Report EERL-71-3, U. S. Environmental Protection Agency(1970年)
- 10) F. A. Rohrman: Power(1971年)
- 11) 森田修二: 土壤学汎論(1970年)

表1 石炭中の放射能

石炭の種類	採取地点	ウ ラ ン 系						
		^{238}U	^{234}U	^{230}Th	^{226}Ra	^{222}Rn	^{210}Pb	^{210}Po
中国炭	淮 北	0.670	0.670	0.670	0.670	0.670	0.703	0.70
中国炭	大 同	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141	0.194	0.19
豪州炭	ミラーブレンド	0.498	0.498	0.498	0.498	0.498	0.596	0.59
南アフリカ炭	ウイトバンク	0.683	0.683	0.683	0.683	0.683	0.719	0.71

表2 焼却灰中の放射能

石炭の種類	採取地点	^{238}U	^{234}U	^{230}Th	^{226}Ra	^{222}Rn	^{210}Pb	^{210}Po
中国炭	淮 北	3.472	3.472	3.472	3.472	—	3.642	3.64
中国炭	大 同	1.720	1.720	1.720	1.720	—	2.366	2.36
豪州炭	ミラーブレンド	2.621	2.621	2.621	2.621	—	3.137	3.13
南アフリカ炭	ウイトバンク	3.557	3.557	3.557	3.557	—	3.745	3.74

表3 放出灰中の放射能

石炭の種類	採取地点	^{238}U	^{234}U	^{230}Th	^{226}Ra	^{222}Rn	^{210}Pb	^{210}Po
中国炭	淮 北	6.944	6.944	3.472	5.208	—	18.210	18.21
中国炭	大 同	3.440	3.440	1.720	2.580	—	11.830	11.83
豪州炭	ミラーブレンド	5.242	5.242	2.621	3.932	—	15.685	15.68
南アフリカ炭	ウイトバンク	7.114	7.114	3.557	5.336	—	18.725	18.72
濃縮効果		2	2	1	1.5	—	5	5

表4 放射能の年間放出量

石炭の種類	採取地点	^{238}U	^{234}U	^{230}Th	^{226}Ra	^{222}Rn	^{210}Pb	^{210}Po
中国炭	淮 北	20.64	20.64	10.32	15.48	5159	54.12	54.1
中国炭	大 同	4.34	4.34	2.17	3.26	1086	14.94	14.9
豪州炭	ミラーブレンド	15.34	15.34	7.67	11.51	3835	45.89	45.8
南アフリカ炭	ウイトバンク	21.03	21.03	10.52	15.78	5259	55.37	55.3

表5 地表付近の空气中放射能（最大年平均濃度地点において）

石炭の種類	採取地点	^{238}U	^{234}U	^{230}Th	^{226}Ra	^{222}Rn	^{210}Pb	^{210}Po
中国炭	淮 北	1.113	1.113	0.556	0.835	278.177	2.918	2.9
中国炭	大 同	0.234	0.234	0.117	0.176	58.558	0.806	0.8
豪州炭	ミラーブレンド	0.827	0.827	0.414	0.621	206.786	2.474	2.4
南アフリカ炭	ウイットバンク	1.134	1.134	0.567	0.851	283.570	2.986	2.9
自然放射能		60	60	60	60	10^8	$10^4 \sim 2 \times 10^4$	$10^3 \sim 2 \times 10^3$

※は実測値⁶⁾

表6 土壌の放射能蓄積量（最大年平均濃度地点において）

石炭の種類	採取地点	^{238}U	^{234}U	^{230}Th	^{226}Ra	^{222}Rn	^{210}Pb	^{210}Po
中国炭	淮 北	3.510	3.510	1.757	2.633	—	9.202	9.2
中国炭	大 同	0.738	0.738	0.369	0.555	—	2.542	2.5
豪州炭	ミラーブレンド	2.608	2.608	1.306	1.958	—	7.805	7.8
南アフリカ炭	ウイットバンク	3.576	3.576	1.788	2.684	—	9.417	9.4
全蓄積量 (mci/km ² ・50年)		0.01788	0.01788	0.00894	0.01342	—	0.04709	0.047
土壌の放射能増加量 (pci/g)		6.9×10^{-4}	6.9×10^{-4}	3.4×10^{-4}	5.2×10^{-4}	—	1.8×10^{-3}	1.8×10^{-3}
土壌の自然放射能 (pci/g)		0.596	0.596	0.596	0.596	—	0.596	0.596

表7 個人被ばく線量の推定値（南アフリカ炭使用，最大年平均濃度地点において）

	^{238}U	^{234}U	^{230}Th	^{226}Ra	^{222}Rn	^{210}Pb	^{210}Po
肺被ばく (不溶性)	3.5×10^{-4}	4.4×10^{-4}	3.0×10^{-3}	—	4.4×10^{-4}	5.8×10^{-4}	6.7×10^{-4}
自然放射能による肺被ばく (不溶性)	0.019	0.023	0.313	—	156	1.96~3.91	0.22~0.44
骨被ばく (可溶性)	1.7×10^{-4}	1.7×10^{-4}	0.021	2.5×10^{-3}	—	1.2×10^{-3}	4.4×10^{-4}
全身被ばく (可溶性)	9.9×10^{-6}	9.9×10^{-6}	5.9×10^{-4}	2.2×10^{-4}	—	3.9×10^{-5}	7.8×10^{-5}

—印は線量寄与が少なく決定核種にならないもの。