原発サイト安全性の定量的評価 SPFによるサイト評価

大　西　外　明*

はじめに

原子力発電所のサイトを選ぶ際に考慮すべき要素は，広範囲にわたっている．例えば，1974年9月に発表されたアメリカ合衆国の Regulatory Guide 4.7, "Draft General Site Suitability Criteria for Nuclear Power Stations"（原子力発電所サイトの適合性を検討するに際して，規制側で考慮する必要があるサイトの主要特性について論じたもの）では，サイト選定上考慮すべき要素として，次のものをあげている．

地質および地震，気象，人口密度，水文，生態系，土地利用状況，工業・軍事・輸送施設，社会経済

などである．Regulatory Guide では，これらの要素は，原子力発電所サイトの妥当性を検討するときのスクリーニングプロセスにおいて考慮されるべきものであり，最終的なサイト決定は，プラント特性を加味した詳細な評価と便益・費用解析などの結果を基にして，行われるべきものであるとしている．これらの諸要素を，いくつかのサイト候補地点について，定量的に比較検討するやり方として，関係する諸要素の個々のものについて評価する方法と，これらの要素を同時に総合的に取り扱う方法が考えられる．

わが国では，考え方としては前者の方法によって計画が立てられているが，その定量的な手法は未確定な状態にある．この点，最近合衆国で発表された，原子力発電所候補サイトの人口密度がもつ安全性の意味を定量的に比較検討するために，サイト周辺人口密度係数（SPF）の概念を応用する考えは[1]大いに注目する価値がある．

もちろん，原子力発電所サイト選定は人口の面からのみ定まるのではなく，上述のような数多くの要素が関係してくる．しかし，原子力発電所が他の産業施設と異なる大きな特徴は，放射性物質を取り扱う点にあり，原子力施設の安全性に関する議論の焦点も，現在および将来における人間生活の安全性確保という点にあることを考えれば，発電所周辺の人口分布や人口密度が特に重要な意味をもつことが理解できる．

このような見地から，SPF によるサイト評価手法の概略を紹介し，それをわが国の原子力発電所に適用した結果について述べる．

1. SPF による原子力発電所サイト評価

原子力発電所から大気中へ放射線が放出されると，周辺に住む生物は放射線被曝を受ける．人体が受ける被曝はその経路のいかんによって，外部被曝と内部被曝とに大別される．外部被曝は，さらに放射線雲によるものと地上降下物によるものとがある．また，内部被曝は，大

* 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科

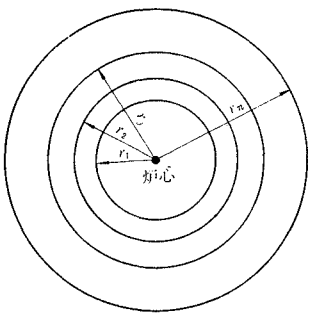
気中の放射性物質を呼吸によって体内に取り入れたり，あるいは，地上降下物となったものを摂取することによって生じるものである．

このような放射線影響を少なくするためには，発電所からの放射線放出レベルを低く保つとともに，発電所を人口の少ない位置に置くことが必要となる．また，最近問題になっている平常運転時の低レベル放射線被曝の遺伝的影響の面からいえば，発電所周辺の人口集団について求めた集団被曝線量を低くおさえうる所にサイトを選ぶことが特に大切である．わが国および合衆国では，原子力発電所周辺に非居住地域（合衆国では排除区域といっている）や低人口地帯を設けることが法的に要求されているが，この非居住区域や低人口地帯の定義は，原子炉の事故時を対象として定められたものである．一方，平常運転時に放出される低レベル放射線が人体あるいは環境に及ぼす影響が問題になっているものの，低レベル放射線に対してサイトが有する安全性を定量的に判断する基準は，不明確なままになっている．

その点，合衆国原子力委員会スタッフによって最近発表された敷地周辺人口係数（Site Population Factor, 略して SPF）は，その定量的評価法として注目に価するものである．

いま，原子力発電所から平常運転時に放出される放射線量を一定とすれば（炉型，および発電所の設計・運転条件を一定とすれば），各サイトの安全性は，その発電所周辺の人口分布との関連で表わすことができる．人口分布は放射線による集団被曝線量への寄与度によって評価されるのであるが，原子炉に近い所の人口のほうが寄与の程度が大きいことは明瞭である．そのために原子力発電所周辺の人口に，原子炉からの距離によって異なる適当な〈重み〉をつけて考えるほうが合理的である．

図—1 に示すように，原子炉を中心に考えたある円の外径を r_n とし，この r_n の所での SPF を次式により定義する．



図—1 原子炉周辺地域の円環分割

$$\mathrm{SPF}(r_n)=\frac{\sum_{j=1}^{n} W(J)\cdot P(J)}{\sum_{j=1}^{n} W(J)\cdot P_0(J)} \quad \cdots\cdots(1)$$

ここに，

$W(J)$：第 J 番目（$J=1, 2, \cdots, n$）の円環内の人口に対する重み関数

$P(J)$：第 J 番目の円環内の人口

$P_0(J)$：ある一定人口密度を仮定した場合の第 J 番目の円環内の人口

第 J 番目の円環の内径と外径は，それぞれ，r_{j-1}, r_j（$j=1, 2, \cdots, n$）である．$P_0(J)$ の定義に用いる仮想人口密度は任意に選べるが，1 000 人/mile^2 とすると

$$P_0(J)=1\,000\,\pi(r_j^2-r_{j-1}^2) \quad \cdots\cdots(2)$$

となる．ただし，r_j, r_{j-1} の単位は mile.

任意の位置での重み関数は，その場所にいる公衆が受ける被曝線量を基にして決める．被曝線量は原子炉から放出される放射性物質濃度に比例するが，その濃度は次式で与えられる．

$$\chi/Q=\frac{\exp(-h^2/2\sigma_z^2)}{\pi u\sigma_y\sigma_z} \quad \cdots\cdots(3)$$

ここに，

χ：放射性雲軸上濃度（curie/m^3）

Q：放射性物質放出量（curie/s）

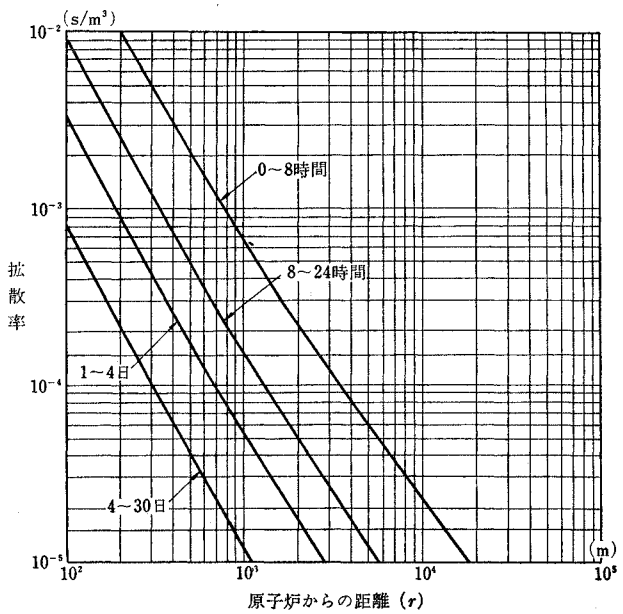
u：風速（m/s）

σ_y：放射性物質プリュームの水平方向標準偏差（m）

σ_z：放射性物質プリュームの鉛直方向標準偏差（m）

h：放出源の有効高さ（m）

式 (3) の χ/Q は，気象条件を与えると原子炉からの



図—2 事故後の各時間における大気拡散率[2]

距離および放出後の経過時間により変化するが，**図—2** は合衆国における標準的な気象条件について図示したものである[2]．被曝評価では経過時間の小さなものが特に重要であるので，**図—2** の 0～8 時間の曲線に注目すると

$$\log(\chi/Q) \propto -1.5 \log r_j \quad \cdots\cdots(4)$$

の関係がある．このことから，Kohler らは，重み関数 $W(J)$ を次のように定めている．

$$W(J) = r_j^{-1.5} \quad \cdots\cdots(5)$$

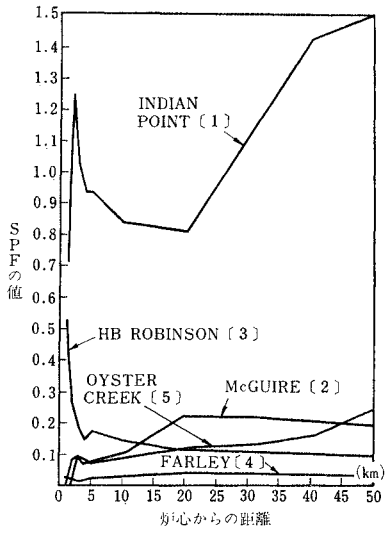
式 (1)，式 (2)，式 (5) より次式となる．

$$\mathrm{SPF} = \frac{\sum_{j=1}^{n} r_j^{-1.5} \cdot P(J)}{\sum_{j=1}^{n} r_j^{-1.5} \cdot 1\,000\,\pi (r_j^2 - r_{j-1}^2)} \quad \cdots\cdots(6)$$

以上のように SPF を定義すると，例えば，ある距離で SPF=0.4 というサイトは，その距離に対して 400 人/mile^2 の一定人口密度のサイトと等価であることになる．

1つの発電所の計画の時点で，複数の候補サイトを比較評価するには，式 (6) で与えられる SPF をそのまま適用できる（実は，SPF の概念は，元来，その目的のために考えられたものである）．しかし，式 (6) を得る過程で，炉型や発電所の設計・運転条件を一定と仮定しているためにこれらを異にする発電所について，式 (6) の SPF を比較して，各サイト間の安全性を比較することは厳密さを欠くかもしれない．だが人体に放射線影響をもたらすのは，個々の放射性核種そのものではなく，それらから放射される γ 線なり β 線（放射性雲に関与するのは γ 線）であることを考え，さらに，各発電所では ALAP の原則（実行可能な限り放射線放出量を少なくすること）に基づいて，放射性物質の放出量を監理していることを考慮すると（少なくとも ALAP の原則の線量目標値が改正になった 1975 年以前の），既設の各発電所について，式 (6) で与えられる SPF を比較することは的はずれとはいえない．

図—3 は，合衆国の5つの発電所サイトについて，原子炉からの距離が大きくなるにつれて SPF の値が変化していく様子を示したものである．また，**表—1** に，合衆国の各発電所の SPF の最大値を示す[3]．



図—3 炉心からの距離と SPF の関係

Kohler らは，合衆国の原子力発電所サイトは，SPF を基準として次の5つのグループに分類されると報告している．**図—3** のうちの1ないし5の数字は，それぞれの発電所が分類されるグループを示すものである．

① グループ 1：SPF $\geqq$ 1.00 で，大都市に近接しているもの．

② グループ 2：大都市から 10 mile (16 km) ないし 3 mile (48 km) 離れており，$\mathrm{SPF}_{(max)}=0.3$ のもの．

③ グループ 3：人口密度が低いが，1 mile(1.6 km) ないし 5 mile (8 km) の場所に小さい町があり，SPF は $r=1$～4 mile で最大となり，それより遠方では 0.3 程度となるもの．

④ グループ 4：人が住んでいない所に設けられた発電所であり，SPF は 0.3 以下でほぼ一定となるもの．

⑤ グループ 5：40 mile (65 km) ないし 50 mile (80 km) に大都会が存在し，SPF は距離に対して増加関数となるもの．

表—1 アメリカ合衆国の原子力発電所の SPF の最大値

発電所名	最大 SPF	発電所名	最大 SPF	発電所名	最大 SPF	発電所名	最大 SPF
Ravenswood	45.00	Peach Bottom	0.387	Vermont	0.161	Arkansas	0.054
Burlington	2.84	Salem	0.385	Prairie Island	0.151	Kewaunee	0.055
Newbold Island	1.35	San Onofre	0.345	Yankee Rowe	0.135	La Crosse	0.040
Zion	1.02	Portland	0.339	Quac Cities	0.118	Sefor	0.038
Limerick	0.903	Rumbolt Bay	0.274	Palisades	0.109	Farley	0.038
Shoreham	0.657	Saxton	0.273	Fitzpatrick	0.093	Cooper	0.036
Bailly	0.619	Ft. St. Vrain	0.256	North Anna	0.085	Brunswick	0.034
H.B. Robinson	0.514	McGuire	0.218	Browns Ferry	0.076	Diavlo	0.030
Oyster Creek	0.490	Calvert Cliff	0.188	Atlantic	0.072	Crystal River	0.030
Millstone	0.435	Maine Yankee	0.184	Watts Bar	0.063	Hatch	0.020
Waterford	0.388	Turkey Point	0.180	Point Beach	0.061		

表—2　わが国の原子力発電所周辺の人口分布

発電所名	積算人口（人）							備考
	1 km 以内	5 km 以内	10 km 以内	15 km 以内	20 km 以内	30 km 以内	50 km 以内	
東海	97	37 411	143 920	405 826	629 700	—	—	昭和 45 年資料による
敦賀	130	556	6 661	58 293	—	251 258	824 619	昭和 44 年資料による
美浜	0	873	5 183	62 088	73 215	—	—	昭和 45 年資料による
福島	0	9 241	35 934	52 539	52 539	130 255	—	昭和 45 年資料による
高浜	0	5 062	20 034	75 478	111 816	—	—	昭和 44 年資料による
大飯	0	981	25 075	47 063	61 553	—	—	昭和 45 年資料による
島根	0	10 922	68 010	136 422	197 010	—	—	昭和 42 年資料による
浜岡	0	16 949	60 499	98 917	175 836	—	—	昭和 44 年資料による
玄海	0	7 395	36 346	71 405	137 661	—	—	昭和 44 年資料による
女川	0	2 991	29 877	66 512	66 512	231 092	—	昭和 44 年資料による
伊方	0	7 982	22 534	70 783	99 804	—	—	昭和 45 年資料による

表—3　わが国の原子力発電所の SPF

原子炉からの距離 (km)	発電所名								
	東海	美浜	敦賀	高浜	島根	大飯	浜岡	伊方	玄海
1	0.08	0	0.04	0	0	0	0	0	0
5	0.38	0.009	0.02	0.05	0.10	0.001	0.2	0.07	0.07
10	0.39	0.01	0.02	0.05	0.16	0.04	0.2	0.07	0.09
15	0.47	0.05	0.05	0.08	0.16	0.05	0.2	0.08	0.09
20	0.36	0.03	0.04	0.08	0.15	0.04	0.2	0.08	0.10

次に，わが国の原子力発電所の SPF の値についてみてみよう．わが国の場合，合衆国に比べて，地形が比較的せまい地域で複雑に変化する．それに伴い，大気の拡散特性も異なってくるので，極端に広い（原子炉より極端に離れた）地域についての SPF を求めて，合衆国のものと比較するのは無意味と考えられる．そこで，原子炉から 20 km（12.5 mile）ほど離れた所までを対象にして検討してみた．

表—2 は，わが国の原子力発電所敷地周辺の人口分布である[4]．これを基にして，各発電所について SPF の大きさを計算した結果は **表—3** のとおりである．SPF の最大値は，東海発電所の 0.47 が最も大きく，島根，浜岡の各発電所で小数1位のオーダーであり，それ以外の発電所では小数2位のオーダーになっている．このことは，わが国では，都会から離れた，いわゆる遠隔地を選んで原子力発電所を設置してきた歴史を示すものといえよう．

おわりに

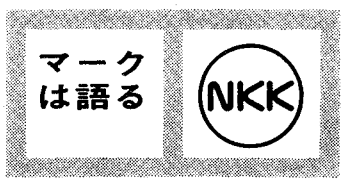
SPF による原子力発電所サイトの評価の考えは，合衆国原子力委員会の公式のものではない．しかし，新しい動向の一つとして注目しておく必要があろう．

式 (5) の重み関数の決め方は，合衆国における気象データを基にしたものである．わが国においては，個々の発電所サイトの大気拡散特性を観測し，**表—3** で述べた位置よりも，さらに原子炉より遠く離れた場所についても SPF を求める作業が今後に残されている．この点については，機会を改めて報告したい．

参考文献

1) J.E. Kohler, A.P. Kenneke & B.K. Grimes : Population Distribution Considerations in Nuclear Power Plant Siting, Nuclear Technology. Vol. 25, Apr. 1975.
2) U.S.A.E.C : Regulatory Guide 1.4, Revision 2, June 1974.
3) 日本原子力産業会議・原子力動力研究会：昭和 49 年度定例研究会報告書，より引用．
4) 科学技術庁 原子炉規制課編：原子力ポケットブック，昭和 49 年．

（1976.4.21・受付）



日本鋼管株式会社

このマークは，大正 12 年に創作されたといわれている．円は当時の主力製品である鋼管を表わし，「NKK」は商号のイニシアルをとったもので，その各英字の角が取れまるみをもっているのは曲げ加工を施した鋼管を象徴している．また円は鋼管を表わすほか「輪」は「和」に通じ社員一同の一致団結をも表現している．このマークは，当時かなりユニークなものとして評判だったようであり，商標として登録され製品に使用していた．

このマークを社章として正式制定したのは昭和 31 年 10 月である．それまでの社章は，円の中に点と「鋼」の文字の入ったものが採用されており，円と点で「日本」を，「鋼」で「鋼管」を表わしていたが，戦後このデザインは世界的に見て通用性に乏しい等の理由から使用されなくなり，代わりに社章としてこのマークが使用されるようになった．すなわち，社員用バッジ，被服，印刷物，施設等はいうに及ばず新聞，雑誌，テレビ等の広告にも広く用いられ一般にもなじまれてきた．商標としてもカタログ，パンフレットその他の取引書類，鉄鋼製品，建築構築材，産業機械をはじめとする多種の重工製品，船舶，肥料に至るまで全世界の幅広い分野において使用されている．（長門茂雄・記）