

原子力地下発電所

高橋 幹 二*

1. ま え が き

原子力発電所施設の全部、あるいは、そのうちの原子炉をふくむ一部の施設を地下に設けたものを原子力地下発電所と呼ぶ。

地形や気象条件がきびしくて地上構造物の建設が困難な反面、岩盤が堅固で地下空洞の開削に適した地域では、水力発電所については古くから地下設置の経験があり、わが国でもいくつかの例がある。

原子炉施設についても、スウェーデン、ノルウェー、スイスなどでは同様の立地条件から、すでに数基の原子炉が地下に設置されており、また、実用規模の原子力発電所についてもいくつかの具体的な地下設置計画が進められている。

原子炉施設の地下設置には、水力発電所の場合と同様の得失があるが、原子炉施設にとってとくに有利と考えられるのは、原子炉事故時の安全性に関する問題である。

まず、一般的に有利と考えられる点は

① 事故時の核分裂生成物（以下 F.P. という）の放出に対し、地上設置の場合に比し比較的容易に格納の目的を達しうる。

② 事故時の F.P. からの直接ガンマ線に対し十分のしゃへい効果を有する。

③ 事故時の炉室内の圧力上昇、飛散物による衝撃に対する構造強度が大きい。

④ 外部からの飛来物、降下物に対する構造強度が大きい。

⑤ 風、雪、雨などの気象条件に左右されることが少ない。

⑥ 基礎工事が簡単である。

⑦ 地形の急峻な地点での建設が可能である。

⑧ 地表の土地利用状況に制約されることが少ない。

一方、不利と考えられるのは

① 岩盤状態に依存するところがきわめて大きく、設置可能な地点は技術的に限られている。

② 地下水状況によって、工費、安全性ともに大きく左右されることがある。

③ 施設の全体的な拡張、変更計画に対するゆう通性におとる。

④ 機器搬入、施工法などに制約がある。

⑤ 工期が一般に長くなる。

などの点であるが、これらの得失は、地点によって異なるのはもちろん、原子炉施設の種類、形式、規模などによっても差異がある。いずれにしても、一つの要素が、他の要素を無視しうるほど決定的な条件でない限り、地下設置の是非は、最終的にはこれらの諸要素を包含したうえでの経済的比較によって決定されることになる。

本文では、原子力地下発電所の概要ならびにこれに関する土木工学上の問題点について述べる。

2. 諸 外 国 の 例

現在までに諸外国で運転、建設、計画中のものを表 1 に示す。

Agesta^{1),2),3)} は当初の Adam, R-3 の二つ計画を一つにまとめたものである。地下空洞は純容積 30 000 m³ のアーチ天井型で、空洞壁はコンクリートライニングの上に 4 mm の鋼板内張りがある。

Halden^{4),5),6)} は元来オランダとノルウェーの共同計画により建設されたもので、将来は付近のパルプ工場に蒸気を供給する計画といわれている。空洞アーチ天井型でコンクリートライニングの上に防水塗料を塗っている。

Lucens^{7),8)} は砂岩質の、岩盤のあまり良くない地点に設置されており、空洞壁の防水塗料としてはエポキシレジン系のもを用いている。

Sulzer⁹⁾ は現在計画中のものであるが、空洞は円筒壁ドーム天井形のもとの直方形のものを連結し、出入りは垂直シャフトのエレベーターによる。ただし、大型機材の搬入、冷却用水、排水管の設置には水平トンネルを使用する。原子炉室は鋼板内張りの予定である。

SENA¹⁰⁾ はフランス、ベルギーの共同計画によるもので、現在建設中のただ一つの実用規模原子力発電所である。

* 正会員 京都大学助教授 工学研究所

表-1 地下原子炉一覧表

名称	R-1	Agesta	Halden	Lucens	Sulzer	E.N.,S.A	SENA
形式	天然ウラン 水型	加圧重水型	沸とう重水型	加圧管型	重水冷却型	沸とう水型	加圧水型
目的	研究	発電・暖房	試験・ 蒸気供給	動力試験	動力試験 蒸気供給	動力試験	発電
国	スウェーデン	スウェーデン	ノルウェー	スイス	スイス	スイス	フランス
完成	1964	1963	1959	1965 完成予定	計画中	計画中	1965 完成予定
熱出力 (MW)	1	65 (将来 125)	5 (将来 20)	30	30	5 (MWe)	825
燃料	N.U	N.U	N.U,E.U	E.U	N.U,E.U	E.U	E.U
減速材	D ₂ O	D ₂ O	D ₂ O	D ₂ O	D ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
冷却材	D ₂ O	D ₂ O	D ₂ O	CO ₂	D ₂ O	H ₂ O	H ₂ O

ある。地下空洞は2つにわかれ、1つには原子炉と一次冷却などを、他の一つには2次冷却系などを設置する。

3. 施設の配置計画

発電所の全施設のうち、どの部分を地下に設置するか、また、それを1カ所にまとめるか、あるいは分散させるかは地下設置の目的によって考え方は異なる。たとえば、その目的が事故時の安全対策にあるか、建設費の節減にあるか、あるいは気象条件との関連にあるかなどによって配置計画は異なってくる。しかし、実際にはこのように一つの排他的な目的をもつ場合は少なく、建設費（とくに空洞工費、配管配線費など）、安全性（事故の拡大と放射能汚染の防止）、熱的経済性、維持管理などを総合的に検討しなければならない。いずれにしても、原子炉を中心とする諸設備はできるだけコンパクトにまとめたという条件と、地下空洞をできるだけ小さくしようという条件は相容れないもので、この点をいかに調整するかが問題となるが、この場合考慮すべき最も大きな外的条件は、岩盤条件すなわち、いかなる形状寸法の空洞が、いかなる位置に、いかなる工費で建設するかという点である。

いま、水冷却型原子炉をもつ発電所の配置計画について考えてみる。図-1,2 はそれぞれ加圧水型（PWR）、沸とう水型（BWR）の場合の発電所系統図である。もちろん、このほかに燃料貯蔵施設、機械室、廃棄物の貯留または処理施設、制御室などがあり、これらも施設の配置計画はかなり重要なものである。しかし、いま、原

図-1 PWR 型原子力発電所系統図

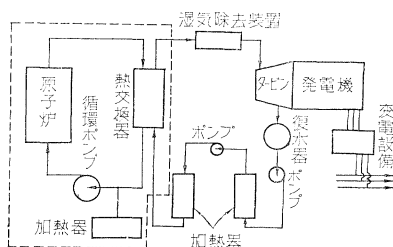
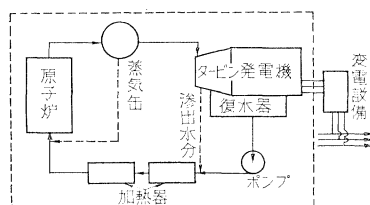


図-2 BWR 型原子力発電所系統図



子炉を中心とする事故時の安全対策の立場から配置計画を考えるならば、まず一般的につきのように考えてよいであろう。

① 重大事故時に F.P. を放出する可能性のある部分および平常時に高い放射能汚染の可能性のある部分は地下におさめる。たとえば図-1,2 で点線でかこんだ部分や使用済み燃料貯蔵施設などはこの部分に相当するであろう。

② 変送電設備、事務的管理室などはとくに地下設置の必要がなければ地上におく。PWR 型の場合のタービン、発電機室もこれと同様に考えてよい。

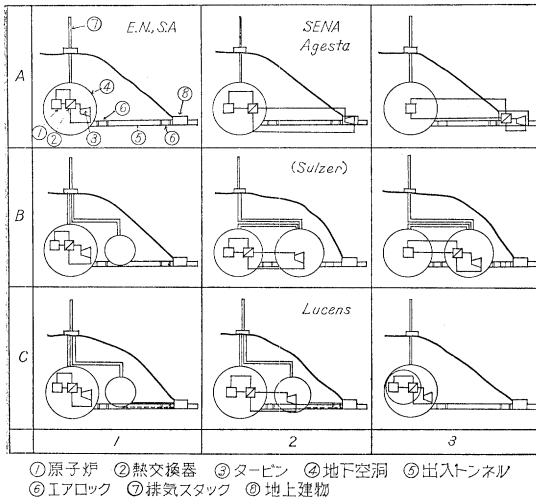
③ 2次冷却系設備などのように前述の両者の中間にあるものは、配管類の長短についての建設費、熱的損失などを考慮して決定する。

以上の考え方はPWR型の場合のように熱交換器を境界として放射能汚染に対する考え方が明確に区分できるものについては一般的に妥当としてよいが、BWR 型のようにタービン発電機室そのものが放射能汚染の可能性のある場合はなお考慮すべき点が残されている。

ともかく、このような考え方からPWR型原子炉の場合に考えられるいくつかの配置例を図-3に示す。

第1群は原子炉、熱交換器、タービンを1個の地下空洞に収納するもので、1-Aはこのほか放射能汚染の可能性のあるすべての設備を1カ所にまとめたもの、1-Bはこれらを2個の地下空洞に分散したもの、1-Cは出入口も別の全く独立した非放射能汚染空洞を設け、制御室などを設置するものである。なお、事故時の安全性をより確保するため第1群で原子炉のみをさらに鋼製容器でかこんだ形式のものも考えられる。

図-3 原子力地下発電所施設配置例



第2群は、原子炉、熱交換器を1個の空洞にまとめたもので、2-Aはタービン室を地表に、2-Bは別の地下空洞に、2-Cは全く独立した別の地下空洞に収納したものである。放射能汚染管理の立場からはこの第2群が最も簡明である。

第3群は種々の変形方式であって、3-Aは地上発電所から原子炉のみを地下におさめたものと考えてよく、3-Bは熱交換器とタービンを別の地下空洞におさめ、3-Cは1-Aにおいて原子炉、熱交換器を鋼製容器でかこんだものである。

4. 地下空洞に関する諸問題

地下空洞に関する土木学的諸問題は、ほとんど岩盤状態、地下水状況のいかに関するもので、これらについては水力発電所に関する経験がそのまま役だつてあろう。

(1) 地下空洞の形状と配置

地下空洞の形状は、球形、ドーム天井円筒形、アーチ天井直方形の3つに大別できる。このほかにも種々あるがおおむねこれらの変形と考えてよい。ごく小規模の原子炉であれば地下空洞は球形、円筒形が有利な場合もありうるが、実用規模発電所では、たとえば水冷却型原子炉とその1次冷却系など最小限の付属設備を格納するのに必要な空洞の大きさは、床面積 1000m²、床上有効高 30~40 m 程度で、いままでの水力発電所の経験からみてもこのような大きさの空洞は、直方形のもの以外は困難であろう。こうしてみると、地下空洞は、スパン 20~30 m の幅に比し、長さ、高さの大きい直方形となるが、原子炉室以外にもいくつかの地下空洞を設ける場合、これらをいかに組み合わせ、配置するかは施工上あるいは地山全体の強度上重要な問題となってくる。

(2) かぶり

地下空洞に必要なかぶりの厚さは、空洞および地山全体の強度と事故時の F.P. の格納性の両面から決まる。強度上からみれば、普通の岩盤の場合少なくとも空洞断面を円形に換算した場合の直径以上のかぶりが必要で、おそらくこれは前述のような空洞の場合は 30~40 m に相当すると考えられる。一方、F.P. の格納性から必要なかぶりもおおむねこの程度である¹²⁾。地表勾配のゆるやかな地点でこのようなかぶりをとるには、いきおい水平トンネルが長くなるので、この意味からいっても地形の選び方が重要である。

(3) 出入口

地下空洞への出入口は、少なくとも人用、機材搬入用が、また場合によっては、冷却水用、配管配線用、緊急退避用、工事用のものが必要で、一般にこれらは水平トンネルによる。地表勾配や周辺の交通事情から、これらのあるものを垂直シャフトとすることもありますがあまり好ましい方法ではない。また、出入口の位置、高さは地崩れ、高潮、高水などの自然災害を防ぐようとくに注意が必要である。

(4) 空洞壁の工法

地下空洞はよほど良好な岩盤内に開削されたものでない限り、素掘りのままでは岩盤のゆるみ、落石、地下水などの防止対策上十分とはいえず、岩壁保護のために種々の対策がなされるが、原子炉を収納する空洞では、この他に気密性に関する条件がみたまされなければならない。気密対策としてはコンクリートライニングのほかに岩盤内のセメントグラウトがきわめて有効であるが¹³⁾、さらに気密塗料の塗布あるいは場合によっては薄鋼板の内張りを行えば地上の鋼製格納容器と同様の気密性を確保できる。

(5) 地下水対策

地下水は、施工上または施設の維持管理上、地下構造物にとって最大のトラブルの一つであるが、原子炉の場合は放射能汚染の問題とも関連してさらに重要な問題となってくる。これに対しては、岩壁保護工や気密工がそのまま防水対策としても役だつが、地下水の多い地点では排水孔などによる積極的な地下水位低下対策が必要である。いずれにしても、空洞へのろう水、空洞周辺の地下水汚染を完全に防止することは容易でないので、地下水の多い地点はあらかじめ避けるとともに、地下水状況の監視が必要である。

5. 原子炉事故と地下空洞の強度

水冷却型原子炉の場合、原子炉に関連する大事故の過程はつぎのように考えられる。

まず、なんらかの原因によって核分裂反応の制御が不

能となり、いわゆる核暴走をおこして瞬間的に核分裂エネルギーが放出される。ついで、この核暴走により、あるいは核暴走がおこらない場合でも、別の外的原因により1次冷却系または2次冷却系が破損すると、高温高圧の、多量の内部エネルギーを有する冷却材が放出される。こうして冷却材が失なわれるか、あるいは冷却能力が失なわれると炉心部は高温となり、燃料被覆金属あるいは燃料自身の金属材料と水との間はいわゆる金属-水反応が行なわれ、燃焼に似たエネルギー放出がある。一方、この間燃料体内の F.P. の核崩壊によりたえず崩壊エネルギーが放出され、これは事故発生後も減衰しながら継続する。

しかし、現在の原子炉ではこのような大事故は全く仮想的であって、事故解析の対象とされている考える最大の事故（最大想定事故）の多くは、冷却材蓄積エネルギーの放出によるものがほとんどであり、その量は熱出力 500 MW の原子炉でおおむね 10^8 Btu 程度である。表-2¹⁴⁾ はアメリカの水冷却型原子炉の格納容器の設計に用いられた最大想定事故時の諸数値である。

表-2

名 称	型	熱出力 (MW)	放出エネルギー (10^6 Btu)				設計圧力 (psig)
			核分裂	冷却材 蓄積	化学 反応	計	
Dresden	BWR	630	0	200	0	200	29.5
Yankee	PWR	480	0	94	0	94	34.5
Indian Point	PWR	500	0	80	0	80	27.5
Shipping Port	PWR	230	4	78	0	82	52.8

このようなエネルギー放出によって原子炉室内の気体、液体は温度が上昇し、また液体は蒸発して圧力上昇がおこる。そして、原子炉室の強度設計に際してはこの圧力、温度の最大値と時間的变化が問題となる。

まず時間的变化についてみると、放出エネルギーが冷却材蓄積エネルギーと F.P. の崩壊熱エネルギーによる場合は、その上昇速度は、冷却材の流出速度からみて、そう急激ではなくせいぜい秒のオーダーであろう。したがって、圧力、温度の最大値は事故発生後の比較的短時間の間に発生するがその衝撃の効果まで考慮する必要はないであろう。一方、核暴走や金属-水反応によるエネルギー放出は急激であって、圧力も衝撃波としての考慮が必要かも知れない。とくに炉心近傍の物体に対してはそうである。

圧力、温度の降下は原子炉室の設計上大して重要ではないが、F.P. の崩壊熱を考慮するとそのエネルギーは、事故発生後 24 hr でもなお 10^8 Btu/sec のオーダーであり、炉室外への熱伝達のいかんによってはこれを無視することはできない。Jantsch¹⁵⁾ はこの崩壊熱による炉心温度の上昇により発生した金属-水反応と崩壊熱自身によるエネルギーにより、事故発生後 1 hr 以内に第2の

温度、圧力ピークが表われる可能性を示している。

このような温度、圧力上昇に対して地下空洞にはいかなる考慮が必要であろうか。

まず圧力最大についてみると、表-2 に示すように、熱出力 500 MW 程度の水冷却型原子炉では、おおむね、 $2\sim 4$ kg/cm² であるから空洞全体の強度からみればほとんど問題とならない。ただ、岩盤と遊離した状態のコンクリート壁では部分的に引張り応力の発生が予想される程度である。これは、地上鋼製格納容器の場合、肉厚 30 mm 程度のもので必要なのに対し大きな利点といえる。この圧力最大値は、将来原子炉がより高温高圧下で運転されるようになればさらに大きくなる可能性があり、また、高速中性子炉の実用化からは当然衝撃圧の発生が予想されることからみて、地下空洞の設計条件もより厳しくなるものと考えられるが、これらの条件に対してなお相当の余裕ある強度をもたせることは十分可能であろう。

温度上昇については、事故時の炉室内気体の平衡最高温度は、水冷却型原子炉の場合おおむね 100°C 前後と考えられているが、やがてこの温度は低下していくので、これによって地下空洞の構造体が強度的な影響をこうむるとは考えられない。ただ事故の状況によっては局部的に、短時間ではあるが数 100°C の高温にさらされることもありうるので、クラックの発生防止そのほかになんらかの対策が必要であろう。

6. 事故時の F.P. 放出に対する地下空洞の格納効果

原子炉事故の周辺環境におよぼす影響を考える場合、最も大きな問題は F.P. の大気中への放出であり、地上の原子炉の場合は、これを防止する手段として、多くの場合、気密格納容器で原子炉室を構成する。

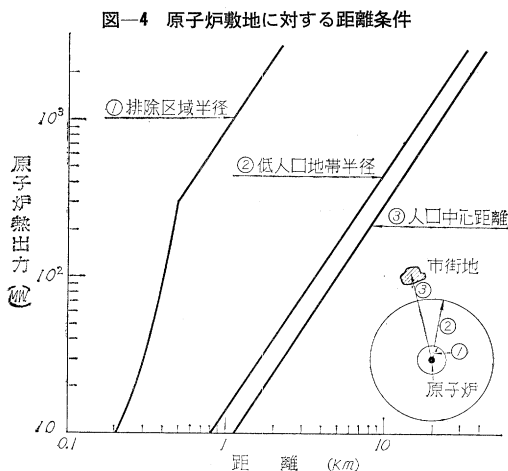
しかし、地下設置の場合は、地下空洞はそのまま F.P. 格納のために役だつ。そして、この場合、岩層や土層の F.P. に対する吸着、保留効果を考えれば、必ずしも地上の格納容器ほどの厳密な気密性は必要でなく、むしろ、低い気密性で地上格納容器以上の十分な安全性を確保できる。ただこの場合問題となるのは、岩層内に吸着保留された F.P. による岩層の永続的な汚染と地下水の放射能汚染であるが、これに対しても十分の安全対策は可能である。なお、これらの諸問題については筆者の前報告¹²⁾を参照されたい。

7. 原子力発電所用地に必要な距離的条件と地下設置

原子力発電所の立地問題を安全対策の立場から考えた場合、立地条件は一般公衆に対する安全確保のための最後の手段である。確かに、現在の原子炉には何重もの事故防止対策がほどこされており、敷地周辺の公衆にま

で障害をおよぼすような大事故の発生は、ほとんどありえないと考えられる。しかし、原子炉そのものがまだ開発途上にあること、一方、万一大事故が発生した場合その影響の重大なことを考えれば、かなりの安全率をもった立地条件が要求されるのも無理はない。このような考えをもとにして、現在、地上に設置される原子炉の用地には、つぎのような3つの距離的条件が要求されている。まず、一般公衆の居住しない区域（排除区域、実質的には敷地）を設ける。またこの周囲に人口密度の低い地帯（低人口地帯）を確保する。さらに、人口の多い市街地中心から適当な距離（人口中心距離）だけ離れていることである。

いま、以上3つの距離条件を水冷却型原子炉について、アメリカの基準により算定してみると図-4のよう



になる¹⁶⁾。わが国で検討されている立地基準¹⁷⁾では、数値的にはまだ固まっていないが、考え方においてはおおむねアメリカの基準と大差ないし、ガス冷却型原子炉に対するイギリスの考え方¹⁸⁾は楽観的な面もあるが、部分的にはこれに近い距離条件を示している。こうしてみると、図-4の算定値はきわめて仮想的な安全側の値を示すもので、実際に具体的な安全評価、事故解析を行なえばさらにこの値は小さくなるではあろうが、少なくとも現在の段階での一応のめやすを与えるものと考えてよい。

さて、この計算によると、熱出力の原子力1000 MW発電所を地上に設置しようとするれば、敷地として半径約1 kmの広さを必要とし、しかも市街地（人口に対する明確な規定はないがイギリスの考えでは10000人以上）から20 kmも離れていなければならない。このような距離条件をみたし、しかも原子力発電所としてのほかの適性をも備えた地点が果たしてわが国にどの程度存在するであろうか。では、これを地下に設置した場合、これらの立地条件はいかに考えるべきであろうか。これに対する明確な規定は諸外国にもまだ見当たらない。しかし、

地下空洞のF.P.に対する格納性からみて、少なくとも上述の諸条件はかん和されてよいはずである。とくに、事故時に周辺に放出されるF.P.の量が減るだけでなく、その時間的遅れが大きいことは、事故後の対策を容易にするので大都市への人口中心距離制限がゆるくてすむし、また、図-4において出力300 MW近くから、排除区域半径を示す線が折れ曲っているのは、小規模原子炉の場合、排除区域半径は原子炉室内の残留F.P.からの直接ガンマ線によって決まることを意味するが、地下設置の場合はこのような考慮は全く必要でなく、小規模原子炉の場合地下設置はとくに有利であるともいえる。

8. 結 語

以上原子力発電所の地下設置に関するいくつかの問題について述べたが、いずれにしても最終的には、地上設置との経済的比較によってその是非が決定されることになる。わが国の地質構造は一般的には必ずしも地下構造物に対して好条件ではないけれども、今後の土木技術の進歩によれば、安全で、しかも経済的な原子力地下発電所の建設には大きな期待がもてるのではなかろうか。

また、安全性の立場からだけでなく、冷却水の取得、海岸輸送の便利さなどからみて、海岸の急峻な地形が積極的に利用できることは、国土の有効利用からみても望ましいことである。なお、本文は「第2回原子力総合シンポジウム」において発表したものの一部をとりまとめたもので、発表に当たっては、土木学会原子力土木技術委員会の左合委員長はじめ各委員に種々のご援助を戴いたので付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Margen, P.H. et al: A/conf. 8/P/135 (1958)
- 2) Nuclear Power (Mar. 1963), P.40
- 3) Nuclear Engineering (Apr. 1963), P.133
- 4) Hidle, N. & O.Dahl: A/conf. 9/P/246(1958)
- 5) Aamodt, N.G.; A/conf. 11/P/561 (1958)
- 6) Nuclear Engineering (Mar. 1959), P.106
- 7) Binggeli, E. et al: Proo. Symp. Reactor Safety and Hazards Evaluation Technique, Vol. 1, P. 380 (IAEA, 1961)
- 8) Nuclear Engineering (Nov. 1962), P. 449
- 9) P. de Haller & A.F. Fritsche; A/conf. 9/P/246(1958)
- 10) Nuclear Power (Feb. 1962), P. 79
- 11) Kägi, J.: Selective Papers, 6th Int. Cong. & Exhib. on Electronics & Atomic Energy, P.23(P.B. Report Co. 1959)
- 12) 高橋幹二: 地下空洞の核分裂生成物に対する格納性について(土木学会誌投稿中)
- 13) Leardini, T.: 11)と同じ, P.43
- 14) Brittan, R.O, ANL-5948, P.250(1959)
- 15) Jantsch, E.: 11)と同じ, P. 62
- 16) DiNunno, J.J. et al: TID-14844 P. 34 (1962)
- 17) 原子力委員会安全基準専門部会答申資料 (1963)
- 18) Farmer, F.R. & P.T. Fletcher; 11)と同じ, P. 246
この他参考としたもの
- 19) Inglis, D.R. & G.R.: Ringo, ANL-5652 (1957)
- 20) Beck, C.: AECU-3779 (1958)
- 21) Cuénod, M. et al: A/conf. 9/P/252 (1958)
- 22) Carlbohm, L. et al: A/conf. 11/P/561 (1958)
- 23) 上野忠男: 土木学会誌, Vol. 44, No. 10, P.9 (昭34) (1964. 5. 20 受付)