

地球環境時代における原子力発電所
新立地技術への取り組み
Advanced siting technologies of nuclear power plants for global environment

原子力土木委員会
國生 剛治 *
Takaji Kokusho

ABSTRACT ; In view of increasing role of the nuclear power generation from the standpoint of the global environment problem, it is of utmost importance for civil engineers to expand nuclear power plant sites by developing advanced siting technologies and related environment enhancement technologies around the sites as well. The Nuclear Power Civil Engineering Committee in JSCE is doing wide-spectrum activities to systematize these technologies which have been studied so far in several research projects. In this paper these activities are outlined with special emphasis on pertinent technologies to realize the advanced sitings and the environment enhancement.

KEY WORDS ; global warming, nuclear power generation, advanced siting technology, environment enhancement technology

1. はじめに

我が国では、将来にわたる省エネルギー社会への努力を考慮しても、電力化率の上昇傾向は避けがたく、化石燃料使用に対する地球環境上の制約がますます大きくなることを考えると、電力の伸びをまかなうには原子力発電のいっそうの拡大を抜きには解決策が見出せない。

すなわち、地球環境問題は温暖化などのメカニズムについて未知の部分が多いにしても既に国際政治の場の約束事となっており、対応策の立案・実行の時を迎えている。我が国の場合も2000年以降1人当たりのCO₂排出量を1990年レベルで安定化させることと、CO₂総排出量を1990年レベルでの安定化に努めることの二つの目標を柱とした「地球温暖化防止行動計画」を世界に向け表明している。我が国の電気事業の1kWh当りのCO₂排出量は先進諸国と比べると低く、総排出量に占める割合も1/4に留まっている。しかし、それでも電気事業審議会で定められた電力供給目標をもとに2010年時点での電力需要の伸びに対応したCO₂排出量を試算すると、今のままでは1990年レベルから約20%増加すると考えられる。

温暖化を防止するためには、まず社会全体の省エネルギー化を徹底することが基本であるが、それと同時に電気事業としてはできるだけCO₂の排出量の少ない方法で電力供給を行うことが重要である。しかも電力のコストを少しでも低廉にして国民経済への影響を最小限にする必要がある。現在の1kWh当りの平均CO₂の排出量はトータルでみて128gと算出されるが、これを下回る発電プラントのCO₂の排出量の試算値を示したのが図-1である。ここに「トータルでみる」という意味は単に発電用燃料からのCO₂の排出量だけでなく発電設備などの製造・建設まで含んだトータルのCO₂の排出量を含めていることを示している。これより水力、地熱、風力などの自然エネルギーによる発電とならんで、原子力発電のkWh当りのCO₂の排出量が極めて少ないことがわかる。一方、これらの電源の新設によってCO₂総排出量を1トン削減するためのコストを

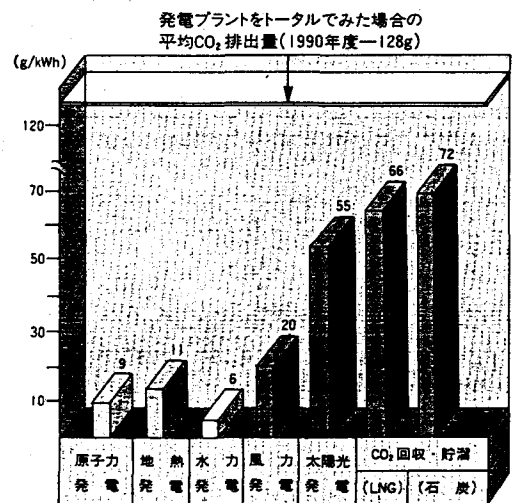


図-1 各種発電プラントのCO₂排出量の試算値 (炭素換算)

* (財)電力中央研究所 我孫子研究所

Abiko Research Lab., Central Research Institute of Electric Power Industry

試算したのが図－2である。原子力発電は自然エネルギーに比べて発電コストが安いことなどからCO₂削減コストは1万円/トンと最も安いという結果が得られる。

このように地球温暖化防止を目指した国際的枠組みの中で、我が国が目標を達成していく上でも原子力発電の拡大のシナリオは不可欠である。このような観点から原子力発電の必要量を達成していくためには今後かなりの新規立地点を開発していく必要がある。

現在、原子力発電所の立地は必ずしも円滑に進んでいるとは言い難い。これを打開するためには、安全運転実績の積み重ねによる社会での信頼感の向上が大前提である。一方、土木技術が立地円滑化に貢献できることとして、図－3に示すように新立地技術による立地点選択の自由度の拡大と、地域発展に貢献し地域に受け入れられる立地のあり方を目指した立地支援技術の開発と地域振興方策の立案がある。

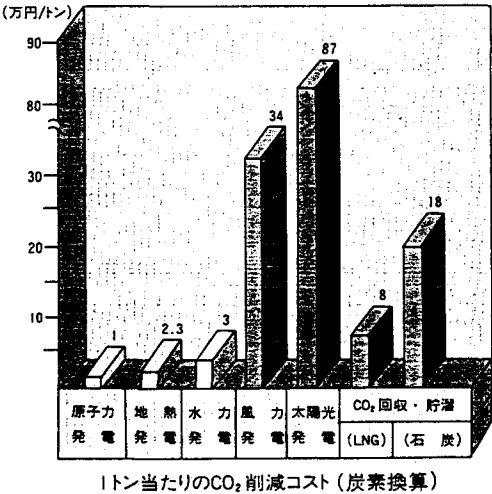
すなわち、原子力発電所の立地点は従来より海岸に面した比較的平坦かつ浅い深度に岩盤がある場所を理想としてきたが、これから需要地の近くにはこのような地点は得難くなると考えられる。したがって、従来とは異なった立地条件でも安全に発電所を立地できる新立地技術を確認し立地点の選択の自由度の拡大を図ることが大切である。新立地技術は地下立地、第四紀地盤立地、海上立地の3方式に分類される。これらの新立地技術の研究は将来のニーズを予想し既に昭和56年から電中研などによって始められた。10年余の研究により各立地方式の我が国における成立性検討や技術開発もほぼ終了した。すなわち、これまでのジェネリックな立地条件を考えた研究の段階を経て、これからは緊急を要する立地点拡大のためにより現実的な地点対応の課題に取り組むと共に、関連基準指針の整備に向けた活動を行う必要がある。

このため、原子力土木委員会では平成3年より新立地部会を設立し、現在までに蓄積されてきた新立地技術の研究成果を学会の場で体系化し、実現のために必要な技術基準・指針に反映することを目指した活動を行ってきた。委員会での検討に当たっては、新立地技術の安全性に関わるハード技術は勿論、発電所のサイト資源を活用した環境面や地域振興に配慮した立地のあり方に関する立地支援技術の検討にも力を入れた。これらの成果は平成6年に学会報告書にまとめ出版する予定であるが、本文では新立地部会の現在までに得られた主要な成果を紹介する。

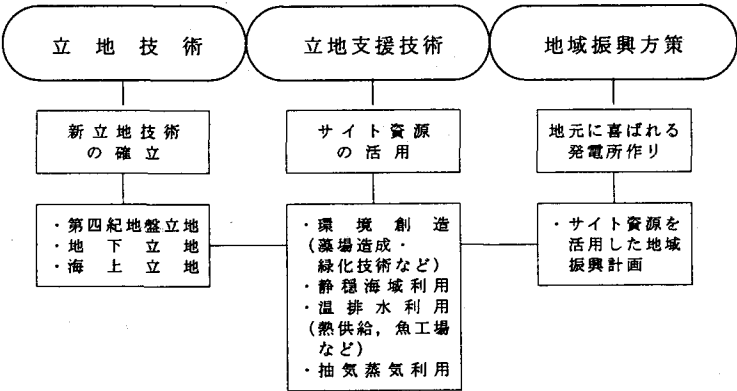
2. 新立地技術の体系化

2. 1 地下立地技術

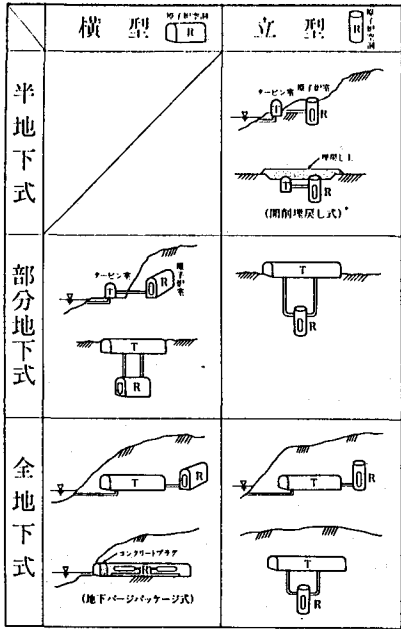
地下式原子力発電所の方式は大別すると図－4のようになる。これらの方式は地形状況や岩盤の条件により適宜選択されることになる。地形が急峻な場合には全地下式が適し、緩傾斜地では半地下式が適している。また、岩盤が堅硬な場合には横型が、



図－2 CO₂総排出量を1トン削減するためのコスト試算



図－3 原子力発電所の立地拡大を目ざした研究の構成



図－4 地下式原子力発電所の分類

岩盤がそれほど堅硬でない場合には立型が適する等、立地点の特性を考慮して最も適した方式を採用する。いずれのタイプにおいても海岸付近の景観保存が図りやすい点は地下立地の大きな特徴である。

例として1,100 MW 1基の横型全地下式のイメージを図-5に示す。横型全地下式の場合の空洞の規模は、原子炉空洞でみると例えば幅31m、高さ77mの大きさとなり、現在の揚水式発電所空洞の最大級のものが、幅27m、高さ54m（東電新高瀬川発電所）であるのに比べると一段と大きい空洞となるが、地質が良好であれば掘削可能である。また、空洞の個数が8～9個必要となり、空洞間の離間距離を適切にとる必要がある。さらに全地下式の場合には空洞上の被り深さが地質により100～150m以上得られることが望ましい。敷地面積としては、出力 1,100MW 1基として、横型方式の場合には 500×500m、立型方式の場合には300×300m 程度と想定され、この範囲で空洞周辺の地質が良好な岩盤であることが必要である。

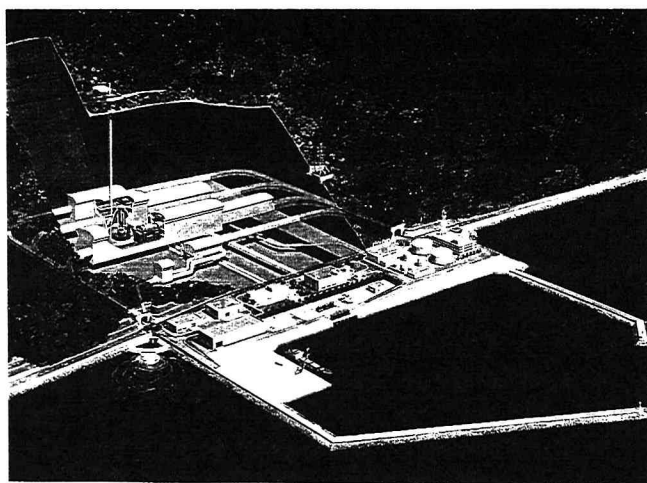


図-5 横型全地下式発電所の概念
(1100MW級 1基)

地下空洞の中に原子炉建屋を収納する方式については種々のものが考えられており、空洞中に地上式と同じような考え方の建屋を持ち込む考え方以外に、空洞周辺岩盤の耐圧性などを積極的に活用し、建屋構造を合理化する考え方もある。

地下式原子力発電所の耐震性に関して、①地中地震動の特性、②地震時の空洞の安定性、③機器・配管系の耐震安定性等の検討が行われている。水力地下発電所空洞での地震の観測結果によれば、地下空洞底部（EL. 65m）の加速度と地上（EL. 304m）での加速度の比率Rは1/3～1の範囲でばらついているが、平均的には 1/2 程度となっている。このことは地下立地により入力加速度の値を地下立地の場合に比べ低減できる可能性を示している。また、空洞内では加速度増幅が小さいことも明らかにされており、原子炉建屋を空洞の壁面と結合した構造にすることにより、震動応答抑制効果を期待できる。これらのことより、地下立地は地上立地に比べ入力地震動の低減や建屋での地震動増幅の抑制等において耐震的に有利となり、この面から合理化が図れる可能性がある。

地下空洞は良好な地質が得られる場所を選んで掘削される。この場合、掘削時に空洞周辺に発生するゆるみ領域は厚さ12m程度までであり、この条件でさらに地震力を考えた場合でも、ゆるみ領域が大きくは拡大しないことが解析的に得られている。この程度のゆるみ領域はロックボルトの補強により十分対処可能である。さらにこのような地質モデルでは考慮していない個々のサイトでの小規模な弱層、破碎帯による影響はグラウトなども併用した事前の補強工により十分対処可能と考えられる。したがって、地震時の空洞安定性は掘削時の安定性が確保される地質条件であれば十分クリアーできると言える。

このように地下立地の成立性は十分あると考えられるが、在来の上立方式に比べ空洞中に建設されるため、それに関わる耐震や地下水などに関する技術を整理・体系化し安全性評価を行う標準的方法を、現在、新立地部会において検討しているところである。

2.2 第四紀地盤立地技術

原子力発電所の第四紀地盤上への立地は欧米においては極く一般的な立地方式であるが、大きな設計地震力を考慮し岩盤上への立地を原則としてきた我が国において第四紀地盤立地を導入するためには、重要構造物の基礎地盤となる第四紀の洪積層の地震時安定性が十分確保でき、支持力や沈下の面から建屋の安定性に問題が生じないことを実証することが前提となる。

現在建設されているタイプの原子炉建屋を現行の指針・規準の考え方でせん断波速度が300～400m/sec 程度の第四紀地盤に建設することの成立性を検討した結果は以下のとおりである。

- ① 建屋基礎を支持層に根入れしない場合には建屋の滑動抵抗が不足するが、支持層に10～20m程度根入れすれば滑動抵抗が大きくなり、建屋の安定性が確保できる。
- ② 建屋の地震応答に関しては、岩盤立地に比較すれば加速度が主に短周期領域で低減して、床応答スペク

トルのピークが長周期側にずれるため、機器配管系の耐震設計が有利に行える可能性がある。

以上の結果を踏まえた第四紀地盤に建設する原子炉建屋の最適構造が検討されている。BWRの場合の一例としては図-6の概念図に示すように、基礎寸法が $115 \times 115 \text{ m}^2$ 程度の共通基礎の上に、原子炉建屋、タービン建屋、廃棄物処理建屋に収納される機器・配管類を収納する。建設コストの観点からも、このような形式は従来の岩盤立地のそれと比較して、ほぼ同程度になるとの試算結果が得られている。

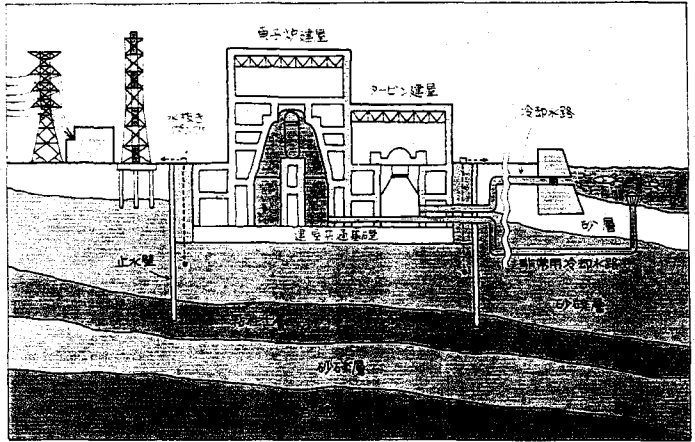


図-6 第四紀地盤立地の概念

原子力発電所が立地の対象とする洪積の砂礫地盤は通常の構造物の支持層となっているが、原子力発電所のような重要構造物の支持層として大きな地震力や接地圧を想定した検討はほとんど行われてこなかった。このため、地盤の地震時安定性評価を最重要課題として、地盤調査、室内実験、解析による検討が進められてきた。原子炉建屋基礎地盤の調査は従来の岩盤立地では試掘横坑を中心に行われているが、未固結で地下水位の高い第四紀地盤においては試掘横坑調査は地下水処理、坑壁保持などの点から問題が多い。すなわち、第四紀地盤立地ではサンプリング試料による地盤の物性評価が岩盤立地よりもはるかに重視されると考えられるが、そのため、サンプリング時に試料が受ける乱れの影響を極力軽減したサンプリング技術の確立が進められてきている。また、第四紀地盤は岩盤に比して強度が小さく変形性が大きいので、常時・地震時におけるサイト地盤全体の地すべり等に対する安定性は勿論、原子炉建屋の支持力や沈下についても十分な評価が必要である。このため安定性の概略検討段階から詳細検討段階に至る各段階に応じて、地盤調査・試験により得られる地盤モデルと物性値に基づき、簡便な評価法から厳密な詳細評価法までを組み合わせた安定性評価法の流れが設定された。とくに重要な地震時の安定性評価については地震による地盤物性の時間的変化を厳密に表現できる非線形応答解析法も開発されており、これによれば大地震を受けた後の地盤沈下などの評価も可能である。このような解析によって地震時の地盤変形量の評価法が厳密化し精度が向上することにより、建屋や機器が考慮すべき相対変位や傾斜などに関する設計条件が明確化できる。一方、建屋の応答に関して第四紀地盤立地の特徴として考慮すべき点としては、建屋基礎が支持力確保の面から地盤中に深く埋設されるため、埋設することが建屋応答に及ぼす効果が大いこと、支持地盤が軟質で地盤物性の非線形効果が現われることなどがあげられる。これらの影響を調べるため、原子炉建屋もしくは類似構造物についての地震観測も数多く行われており、埋設構造物の震動応答は周辺地盤の応答に比べて著しく小さく、高い耐震性を有していることを確認している。以上のように、最近の土質・耐震工学の発達により我が国においても第四紀地盤立地が十分可能である見通しが得られている。しかし、在来の立地方式と比べ軟質な地盤上に立地されるため、それに関わる地盤の調査・試験、地盤の安定性・沈下量などの解析や建屋・機器の地震応答解析などについて技術を整理・体系化し、安全性評価を行う標準的方法を現在新立地部会において検討しているところである。

2. 3 海上立地方式

海上立地原子力発電所の有望な構造型式として防波堤で囲んだ水域にプラントを搭載したバージを係留する浮揚式と海底岩盤に基礎を設置する人工島式があげられる。

このうち特に、人工島式立地方式の特徴としては、

- ① 海底に岩盤がある場所に人工島を築造し、そこに発電所を立地するので、人工島建設後は現行の発電所とほぼ同一技術による建設が可能となる。
- ② 沖合に立地するため、陸地の土地利用へのインパクトが少ない。
- ③ 人工島と陸との間の海域の利用などにより海域環境創造など地域共生をめざした立地上の工夫を図りやすい。

などがあげられる。すなわち、人工島式では一旦人工島を築造した後は在来立地とほとんど変わりではなく、人工島建設以前の海底の地質・地盤の調査試験法および防波護岸等の外郭施設の耐震・耐波設計法の合理化などの技術課題が残されているのみである。これらについての解決を図り、人工島式立地の実現性を増すための検

討が現在進められている。

人工島の標準的な立地条件としては以下のような項目を想定している。

人工島規模：1 km×0.5 km (110万kW級×4基)

地形条件：外洋性海岸，海底は岩盤，海底勾配＝1／100，人工島前面水深＝20 m

設計外力：地震力は在来立地と同条件，波浪条件は限界沖合波高15 m程度を想定，

津波は在来立地と同条件

人工島式の配置計画の一例を図－7に示す。電気出力1,100MW級4基のこの例では仮設スペースおよび幅30 mの越波排水路を含めて人工島造成面積は1000 m×500 m＝50万㎡である。波の静穏な陸側を除いて大規模な防波護岸と越波排水路により島の周囲を囲い，その中には地震時液化が生じない条件で埋立が行われる。冷却水の取水は静穏な陸側から行われ，沖側防波堤を通して放水される。建設コストは主に人工島の建設のため在来立地に比べ水深15 mの場合10％程度の上昇となる。

人工島方式の合理化課題としては，在来の沿岸立地のようなプラ

ント基礎底面レベルでの調査横坑の掘削に代わるものとして，高精度の音波探査など物理探査とボーリングコアの試験および孔内載荷試験等の組み合わせで詳細な地質や地盤物性を把握するシステムの構築を図ることがあげられる。このため，これを可能とする個々の調査・試験技術の高精度化とこれを組合せた総合的な評価精度の向上を目ざした研究を行っている。さらに人工島式では防波護岸が人工島前面では全高が約40メートルにも達する大規模かつ重要な外郭施設になる。その構造形式としては，消波ブロックで被覆したケーソン堤構造とし，急激に破壊することがなく，修復が可能なものとするのが望ましい。今までに，大型模型実験からは防波堤はいわゆる安定限界を越える地震および波浪に対しても，直ちに急激な破壊の進行に至ることなく余裕があることが示されている。これらの見通しの下に現行設計外力を大幅に越える条件に対して構造物の外力に対する粘りを評価に取り込む合理的設計法の確立に取り組んでいる。

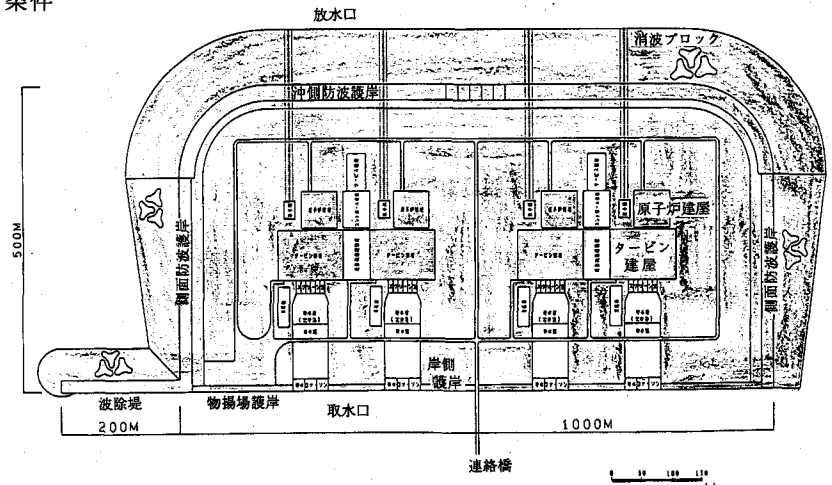
一方，人工島立地の大きな特徴である人工島と陸との間の静穏海域の有効活用のためには人工島建設後の周辺海域の波浪・海浜流や海浜変形を事前に評価する技術が重要である。このため，大型水槽による模型水理実験や数値解析による研究が行われており，評価技術の精度向上が図られている。このような評価技術は次に述べる静穏海域を利用した立地支援技術の具体的計画立案に反映していくことになる。

3. 立地支援技術

発電所の立地の実体は従来ともすれば立地地域にとって受け身なものになりがちであったが，これからは「地域の自立的発展を見すえた地域社会と発電所とのパートナーシップ」をめざすべきであろう。このような観点で発電所の立地が地域の長期的発展に結びつき，その存在価値を認められるような立地のあり方をめざし，土木工学は立地支援の面からも大いに貢献すべきであろう。前述の新立地技術に加え，新立地部会ではこのような立地支援の検討を行うため，ここでは海域利用を中心とした技術メニューの特に豊富な人工島式立地を対象として，海域利用コンセプトの検討とその中心となる静穏海域利用技術の検討を行っている。

人工島周辺の利用を図るためのサイト資源を活用した立地支援技術のメニューとしては海浜造成，藻場造成，緑化，景観設計などの環境創造技術がある。いずれも立地以前にはアクセントの乏しかった外洋に面した直線海岸などにおいて人工島の建設によって大巾な環境改善が期待できるものである。特に人工島と陸との間に形成される静穏海域が環境創造技術の適用の中心となり，そこを利用したマリーナリゾート，海洋牧場，親水性海浜などが地域振興に貢献することが期待できる。

これらの環境創造技術とは異なるが，有望なサイト資源として発電所を源とする熱の利用がある。温排水利用については既に魚貝類の養殖などに利用されているが，温排水以外の発電所からの高熱（150～200℃）を地

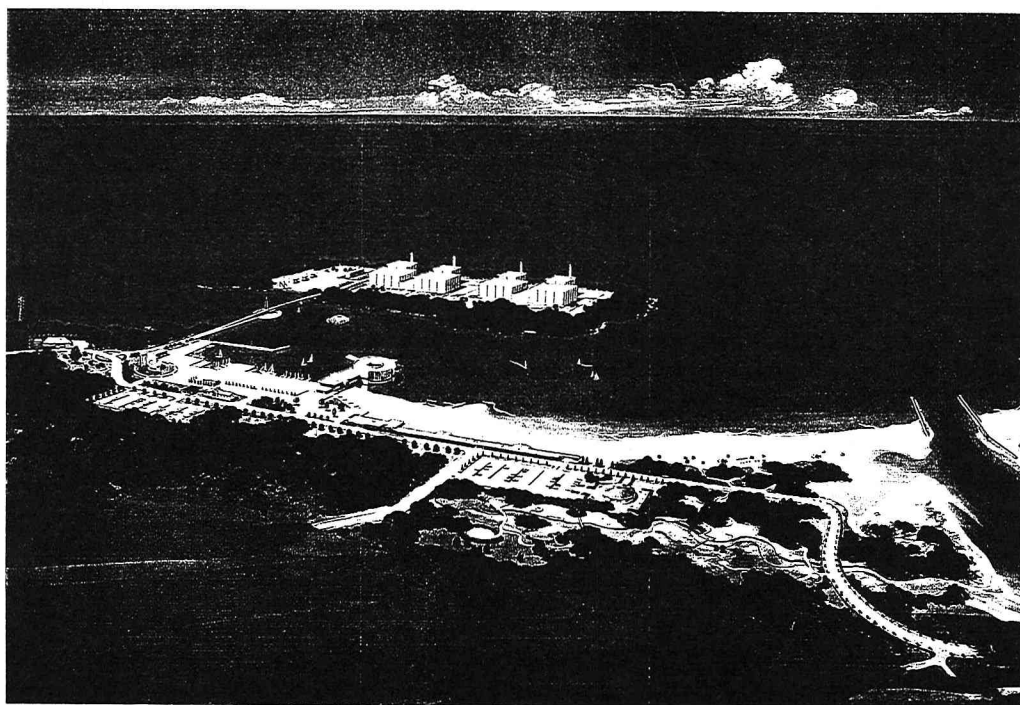


図－7 人工島式原子力発電所のレイアウトの一例
(1100MW級 4基)

域の産業や民生用に供給することにより、地域振興に大いに役立てられる。この高温熱利用に最も適しているのは発電所の定格出力に余裕が出る冬場であり、地域熱需要のピーク時期とも一致する。このような原子力発電所から地域への熱供給は海外においては既にフランス、スイス、カナダなどで行われており、地域冷暖房、温室栽培、醸造、飼料乾燥などに活用されており、我が国でも地域に貢献する発電所の観点からその実現が図られるべきである。

このような技術メニューを包含し我が国での自然・社会環境を考慮したいくつかの海域利用コンセプトを創出した。図－８はそれらのコンセプトの一例を示す。この構想の基本概念は“海の恵みを知る海洋観光・レジャー・研究・教育の複合施設”でありそれを実現するために、サイト資源として発電所温排水利用、人工島背後の静穏海域利用が図れている。人工島の基本的規模は2.3で述べた4基の発電所を想定した1km×0.5kmの大きさであるが、環境面への配慮から島の陸側護岸には人工岩礁を配している。北側の海浜部は水と緑の公園ゾーン、中央の人工島背後は海洋リゾート・カルチャーゾーンとなっており、静穏海域の有効活用とマリナーの景観的効果を用いて海洋性リゾートのイメージを盛り上げる。静穏海域は温排水の利用により準自然型の漁場となり、海岸地形に応じ変化に富んだ海釣が体験できる。また、海中ネットにより大型魚を飼育する海洋牧場も可能となる。温排水は海洋牧場の水温コントロールなどの熱源となるが、潮流の観測に基づいて流れと温度のコントロールを行う。

一方、このようなコンセプトを実現する上で個々の環境創造技術が十分適用可能なものとなっている必要がある。このため、特に周辺海域の藻場造成と人工島の緑化についてフィールド試験・調査の結果に基づき、技術体系化に取り組んでいるところである。



図－８ 人工島式発電所の海域利用コンセプトの例

4. おわりに

冒頭に述べたように、原子力発電の立地拡大は我が国にとっての緊急課題であり、それに技術面から応える方策として開発を進めてきた技術を早期に実現に移すことが期待される。今後、新立地技術を実用化していくためには在来の立地技術と異なる部分について技術基準を整備し、国の関連指針などについても見直しを求めていく必要がある。一方、原子力立地は地球環境面だけでなく地域の環境創造・改善にも配慮し、地域の長期的発展に貢献できることが不可欠である。このため立地に伴って生まれるサイト資源を今まで以上に積極的に地域社会が活用できるような技術開発も重要である。これらの技術を総合化し、原子力発電所が長期にわたり地域の人々から喜ばれるような理想的立地に少しでも近づけられることを目標に行われている原子力土木委員会新立地部会の活動をここに紹介した次第である。