

第 1 章

1

人工島式海上立地の  
概要と技術的な課題

## 第1章 人工島式海上立地の概要と技術的な課題 目次

我孫子研究所 副所長 西 好一

前我孫子研究所 上席研究員 研究参事 鹿島 遼一

|       |                     |    |
|-------|---------------------|----|
| 1 - 1 | 海上立地とは              | 9  |
| 1 - 2 | 国内外における海上立地発電所構想    | 9  |
| 1 - 3 | 海上立地方式の種類           | 11 |
| 1 - 4 | 人工島建設の歴史            | 13 |
| 1 - 5 | 原子力発電所人工島式海上立地の技術課題 | 14 |



西 好一（1975年入所）

地盤工学を専門とし、各種電力施設の立地・建設技術にかかわる研究に従事している。新立地技術の研究には立ち上げの段階から参加し、特に第四紀地盤立地、人工島立地について、地盤調査・評価法や地盤の地震時安定性、立地の成立性評価などの研究を行ってきた。現在、土木学会でまとめた新立地技術の体系化を踏まえ、通産省主催の委員会にて国の指針作成に協力している。



鹿島 遼一（1964年入所。1999年6月退職）

火力・原子力発電所の沿岸立地に伴う耐波設計、海浜変形対策などの海岸工学課題に従事。海上立地技術については、当所の研究の端緒となった昭和50年代の国からの受託研究以来一貫して関わった。電力共通研究成果などに基づいて、土木学会原子力土木委員会における人工島式立地技術の体系化(1996、1999)に尽力した。現在、(株)シー・アール・エス取締役副社長。

## 1 - 1 海上立地とは

海上立地とは、海洋空間を利用した立地方式の総称である。大別すると、海底地盤に基礎を構築し、構造物ならびに構造物に作用する外荷重を支持させる着底式と、浮力を利用して構造物を浮揚させる浮体式の2種類に区分することができる。

原子力発電所を対象とした海上立地を考える時、その特徴として次のような点が挙げられる。

- (1) 立地地点選択の自由度が大きい。特に電力需要地の近接が図りやすい。
- (2) 陸域の土地利用への影響が少なく、発電所からの離隔距離もとりやすい。
- (3) 陸に近接した比較的浅海域に立地する場合、発電所

人工島や防波堤による波の遮蔽効果により陸との間に利用価値の高い静穏海域が生まれる。

- (4) 在来立地方式に比べて波浪などの海象条件が発電所の安全性に与える影響が大きくなる。
- (5) 海岸変形・漁業や船舶の航行などに与える影響を検討しておく必要がある。

このように、海上立地方式は(1)、(2)、(3)のような大きな長所を有した我が国に適した立地方式であり、(4)、(5)のような安全面・環境面などからの課題への対応により、原子力発電所の立地方式として充分実現可能な方式であるものと言える。

## 1 - 2 国内外における海上立地発電所構想

今までに、発電所の海上立地構想が提案され、その成立性に関して我が国および世界各国でかなり以前より検討されてきた。

周知の通り、関西電力により埋立て人工島式による火力発電所が建設され、1984年より運転を開始している。また、湾内ではあるが埋立て地である東扇島でも東京電力により大規模なLNGタンク基地および火力発電所が建設され、運転がなされている。

原子力発電所について、電力中央研究所では他機関に

先駆けて沖合原子力発電所構想を創出し、その成立性に関する予備的な調査を行ってきた。

また、実現はしなかったものの、許認可申請まで漕ぎ着けたものとして、米国のOff-shore Power Systems社(OPS社)が浮揚式海上立地原子力発電所を大西洋岸に建設することを計画したプロジェクトがある。

これらの海上立地構想を一覧表としてまとめたものが表1-2-1である。

表1-2-1 比較的大規模な海上立地発電所構想・プロジェクトの例<sup>(1)</sup>

| 構想番号 | 構想例                                      | 提案者  | 利用目的   |       | 構造型式      |      |        | 防衛型式 | 設置水深(m)      | 開発状況   |             | 備考                                   |
|------|--|--|--------|-------|-----------|------|--------|------|--------------|--------|-------------|--------------------------------------|
|      |  |  | 原子力発電所 | 火力発電所 | 海上都市・海上空港 | 洋上備蓄 | 築島式埋立式 |      |              | 築島式杭立式 | 沈没式工場の沈没複合式 |                                      |
| 1    | 浮揚式原子力発電所                                | 電力中央研究所・東芝・日立・三菱                                       |        |       |           |      |        |      | 0 ~ -20      |        | 1987        | PWR、BWR型 1100MW x 2基                 |
| 2    | 洋上原子力発電所                                 | C. E. G. B (イギリス中央発電局)                                 |        |       |           |      |        |      | -            |        | 1981        | PWR型 1250MW x 2基                     |
| 3    | ニュークリア・フローティング・アイランド(NUFIS)              | 日本原子力研究所(JAERI)  |        |       |           |      |        |      | -100 ~ -150  |        | 1979        | PWR型 1200MW x 1基                     |
| 4    | Artificial Islands off the Belgian Coast | Haecon N. Y.   |        |       |           |      |        |      | -12 ~ -145   |        | 1978        | 5,000 ~ 10,000MW                     |
| 5    | 着底式海上発電所                                 | 藤井 徹   |        |       |           |      |        |      | -30          |        | 1977        | 800MW x 4基                           |
| 6    | 洋上原子力発電所                                 | 脚機械振興協会  |        |       |           |      |        |      | -100         |        | 1975        | BWR型 1000MW x 2基                     |
| 7    | Atlantic Generating Station              | Offshore Power Systems Inc                             |        |       |           |      |        |      | -9.2 ~ -12.8 |        | 1970 ~ 1975 | PWR型 1150MW x 2基                     |
| 8    | 耐震性のある浮上型原子力発電所                          | オークリッジ国立研究所(ORNL)                                      |        |       |           |      |        |      | -10          |        | 1974        | PWR型 1000MW x 1基                     |
| 9    | Tuned Sphere                             | Sunders Nuclear Corp.                                  |        |       |           |      |        |      | -            |        | 1971        | 1000MW x 1基                          |
| 10   | 浮揚型海上原子力発電所                              | 新発電方式総合調査委員会   |        |       |           |      |        |      | -100         |        | 1971        | 1000MW x 2基                          |
| 11   | 海底原子力発電所                                 | 新発電方式総合調査委員会   |        |       |           |      |        |      | -100         |        | 1971        | 完全潜体式PWR型 1000MW x 1基                |
| 12   | 築島型原子力発電所                                | 小林健三郎  |        |       |           |      |        |      | -11.2        |        | 1971        | 1000MW x 4基                          |
| 13   | Bolsa Island Project                     | The Metropolitan Water District of Southern California |        |       |           |      |        |      | -10          |        | 1971        | PWR型 1800MW                          |
| 14   | 海底原子力発電所                                 | 森田定市   |        |       |           |      |        |      | -            |        | 1970        |                                      |
| 15   | 沖合原子力発電所                                 | 脚電力中央研究所・大成建設(株)                                       |        |       |           |      |        |      | -20          |        | 1967        | MOSES計画 DSPC-I型<br>BWR型 1200MW x 24基 |
| 16   | 沖合原子力発電所                                 | 脚電力中央研究所・大成建設(株)                                       |        |       |           |      |        |      | -15          |        | 1967        | MOSES計画 DSPC-II型<br>BWR型 750MW x 5基  |
| 17   | 沖合人工島石炭クリンエネルギー基地構想                      | 国井大蔵・三井建設(株)   |        |       |           |      |        |      | -20 ~ -50    |        | 1982        | 1000MW x 2基                          |
| 18   | 埋立式石炭火力発電所(沖合人工島構想)                      | 運輸省・街経団連・街鋼材倶楽部  |        |       |           |      |        |      | -20、-50      |        | 1981        | 1000MW x 3基                          |
| 19   | 浮体式石炭火力発電所(沖合人工島構想)                      | 運輸省・街経団連・街鋼材倶楽部  |        |       |           |      |        |      | -20、-50      |        | 1981        | 1000MW x 3基                          |
| 20   | 沖合防波堤併用石炭火力発電所                           | 運輸経済研究センター   |        |       |           |      |        |      | -30          |        | 1980        | 500MW x 4基                           |
| 21   | 洋上石炭エネルギー基地                              | 運輸省港湾局   |        |       |           |      |        |      | -20 ~ -25    |        | 1980        | 1000MW x 3基                          |
| 22   | 御坊火力発電所                                  | 関西電力(株)  |        |       |           |      |        |      | -10 ~ -17    |        | 1980        | 600MW x 3基                           |
| 23   | 洋上発電所                                    | 資源エネルギー庁   |        |       |           |      |        |      | -50          |        | 1976        | 250MW、500MW、1000MW                   |
| 24   | 洋上火力発電所                                  | 脚機械振興協会  |        |       |           |      |        |      | -20          |        | 1975        | 600MW x 4基                           |
| 25   | フローティング式100MW洋上石炭火力発電プラント                | ハワイ大学J. P. Craven                                      |        |       |           |      |        |      | -            |        | 1975        | 50MW x 3基                            |
| 26   | 着底式海上火力発電所                               | 新発電方式総合調査委員会   |        |       |           |      |        |      | -100         |        | 1971        | 600MW x 4基                           |
| 27   | 浮揚式海上火力発電所                               | 新発電方式総合調査委員会   |        |       |           |      |        |      | -10 ~ -15    |        | 1976 ~ 1981 | 600MW x 4基                           |
| 28   | 神戸ポートアイランド*                              | 神戸市  |        |       |           |      |        |      | 0 ~ -15      |        | 1971 ~ 1976 | 1978年に完成                             |
| 29   | 扇島*                                      | 日本鋼管(株)  |        |       |           |      |        |      | -7 ~ -20     |        | 1970        |                                      |
| 30   | Offshore Brazilian Artificial Island*    | Soros Associates                                       |        |       |           |      |        |      | -20          |        | 1975 ~ 1981 |                                      |
| 31   | 関西新空港(埋立式)*                              | 運輸省航空局   |        |       |           |      |        |      | -10 ~ -15    |        | 1971 ~ 1976 |                                      |
| 32   | 白島地区洋上石油備蓄システム*                          | 石油公団   |        |       |           |      |        |      | 0 ~ -15      |        | 1979        |                                      |
| 33   | 上五島地区洋上石油備蓄システム*                         | 石油公団   |        |       |           |      |        |      | -20 ~ -35    |        | 1979        |                                      |
| 34   | 志布志地区洋上石油備蓄システム*                         | 石油公団   |        |       |           |      |        |      | -5 ~ -12     |        | 1979        |                                      |




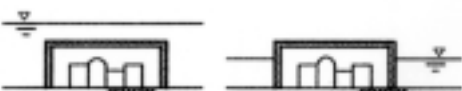

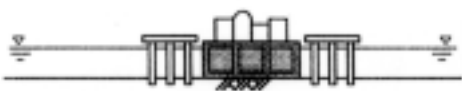


\* ) 印は発電所の例ではないが、大規模かつ実施段階の例であるので掲載した。

# 1 - 3 海上立地方式の種類

以上のように、今までに、国内外において様々な海上立地方式が提案されてきた。これらを考慮し、技術

的に可能な構造型式として分類したのが、表1-3-1である。

表1-3-1 原子力発電所の海上立地構造型式の一般的分類<sup>(1)</sup>

| 大分類 | 中分類<br>原子力発電プラントの建設方法による分類 |          | 小分類<br>海面との関係による分類   | 概念図  | 備考   |
|-----|----------------------------|----------|--|--|--|
| 着   | 現地<br>施工式                  | 築島式      | 埋立式  |    | 護岸の築造と埋立による敷地造成を行い、その後その敷地にプラントを建設する                       |
|     |                            |          | 杭式   |    | 防波堤を築造し、その内側に杭を打設してその上にプラットフォームを建造し、その後プラントをプラットフォーム上に建設する |
| 底   | 工場                         | 沈設式      | ケーソン・沈設式<br>(海上沈設式)  |  | 防波堤を築造しその内側にプラント基礎となる函体またはプラントを搭載した函体を沈設する                 |
|     |                            |          | 海底式  |  | プラントを内蔵した構造物を海底に沈設する                                       |
|     | 製作                         | 築島・沈設複合式 | ケーソン・埋立複合式<br>(埋立・海上複合式)   |  | プラント基礎は函体構造で沈設し、その周囲を埋立てる                                  |
|     |                            |          | 杭・海上複合式  |  | プラント基礎は函体構造で沈設し、その周囲は杭を打設してその上にプラットフォームを建設する               |
| 浮体式 | 浮体式                        | 浮揚式      |  | 防波堤を築造し、その内側にプラントを搭載した浮体を係留する  |  |
|     |                            | 潜水式      |  | プラントを内蔵した浮体構造物の大半を水中に係留する  |  |

我が国の場合、海上立地原子力発電所の当面の立地地点としては、すでに利用度の高い内海よりも外海あるいはそれに近い特性を持った地点が考えられる。また、設置水深は現状の技術水準および経済的な理由により20m程度の浅海域となるであろう。我が国の沿岸の海底勾配を平均1/100と考えると、沖合2km程度に立地することになる。このような条件の下で、表1-3-1の種々の構造形式の中から実現性の高いものを選ぶと埋立人工島式、ケーソン人工島式と浮揚式の3型式が選定される。

これらの概念を示すと次のようである(図1-3-1)。

① 埋立人工島式

防波護岸で囲まれた人工島を埋立て築造し、そこにプラントを在来立地方式と同様の建設方法で建設する方式。

② ケーソン人工島式

防波堤で防護された水域に、プラント全体または一部を搭載したケーソンを沈設する方式(ケーソン沈設式)および埋め立て人工島式とケーソン沈設式の複合型式で、プラント全体またはその一部を搭載したケーソンを沈設

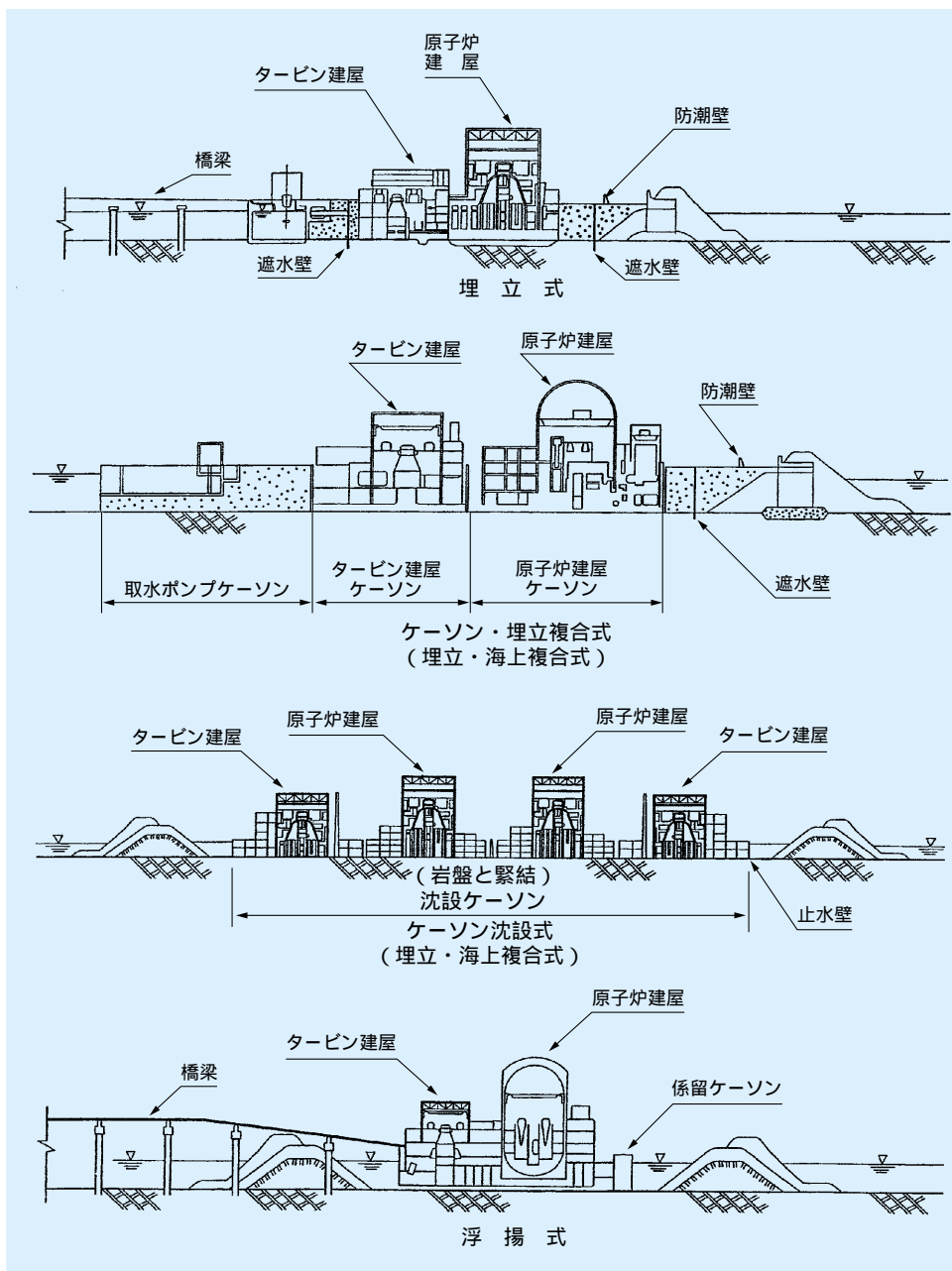


図1-3-1 実現性の高い海上立地の構造型式の概念図<sup>(1)</sup>

し、その周囲を埋立てる方式(ケーソン埋立複合式)。

### ③ 浮揚式

防波堤または護岸で防護された水域にプラントを搭載した浮体を係留する方式。

以上の方式の内、埋立人工島式は海底の浅部に岩盤が

得られるサイトであれば、在来立地方式にきわめて近い立地方式となり、安全評価や建設技術の面から早期の実現が期待される方式と言える。このような見地から以下では埋立式人工島立地を、人工島式海上立地(図1-3-2)と称することとする。



図1-3-2 人工島式海上立地の構想例<sup>1)</sup>

## 1 - 4 人工島建設の歴史

広大な国土を持たない国々の内、特に海岸線を有する国々は沿岸域を埋立てる、あるいは沖合いの海上に人工島を建設することにより、自らの手で国土を造り上げてきた。このような人工島(沿岸域の埋立ても広義の意味で人工島と解釈される)の利用の歴史を大まかに見れば、①農地としての利用、②居住空間、都市空間そして港湾としての利用、③工業施設立地地点としての利用、④交通、輸送そしてエネルギー施設立地地点としての利用、として示すことができる。

①の代表例はオランダそして日本などにおける干拓である。干拓地の地盤は、極めて軟弱な地盤で構成されているのが常である。干拓地を造り上げるためには堤防の築堤が必要である。現在、軟弱地盤の調査・試験および沈下の予測とその対策技術はきわめて高いレベルにあるが、これらの技術はまさにこの軟弱地盤を克服するための技術として発達してきたものと言って良い。

②の例として挙げられるのがイタリアの海上都市ベネチア(表1-3-1に示した杭式人工島に近い)であり、鎖

国時に唯一の外交場所となった長崎・出島である。また、海運の必要性の高まりから、各国で港湾施設の整備も急速に進んだ。

③、④は第2次大戦後の復興に伴う工業・産業の隆盛に対応するもので、大都市臨海埋立て地におけるビッグコンビナートの建設、人工島を利用した空港建設(長崎空港、関西新空港、中部国際新空港など。海外では香港、韓国などに見られる)石油やLNGガスなどの燃料貯蔵基地、先に述べた火力発電所の建設など、枚挙にいとまが無いほどである。

このような近代的人工島の建設に際し、数々の優れた立地・建設技術が開発されてきた。特に、地震国である我が国では、長期にわたる地盤沈下の対策とともに、埋立て地盤の液状化に対する対策が極めて重要な課題となるが、その予測法も合せ、効果的な対策工法に関しても高い技術レベルを保有するに至っている。また、防波護岸などの海岸構造物の建設技術も大規模な港湾施設の整備に伴い、大いに発展してきた。

## 1 - 5 原子力発電所人工島式 海上立地の技術課題

この立地方式は先に述べたように在来立地方式に極めて近く、その成立性に関わるような技術開発課題は少ない。とくに発電プラント本体については、人工島建設後海底の岩盤上に在来と同じ方法で建設されるため、この方式独自の新たな課題はない。しかし、立地の円滑性、経済性や環境への配慮などを考慮した合理的な立地技術を確立する上での主要課題としては次の点が挙げられる。

### 1-5-1 合理的な海底地質・地盤の調査法

在来立地同様、人工島建設前に原子力発電所重要施設を支持する海底基礎岩盤の健全性を地質・地盤調査により評価する必要がある。在来立地方式では、敷地内地質調査としてボーリング調査、試掘坑内調査および岩石・岩盤物性調査として物理特性、強度特性、変形特性などの調査が行われており、従来の指針では、試掘坑内での原位置調査・試験の重要度が高い。海上立地の場合、海底岩盤に試掘坑を掘ることは安全面、コスト面から困難な場合も考えられる。このような場合に対処するためには、海上からの物理探査とボーリング調査、ボーリング孔を利用した調査・試験、ボーリングコアによる室内試験などにより、在来立地に対する調査・試験と同等の精度で調査・試験が行えるシステムを確立することが重要である。

### 1-5-2 防波護岸の合理的な耐震・耐波設計法の確立

人工島立地においては、発電所建屋は海域に設置され、人工的な埋立地盤に囲まれている。また、海から建屋までの距離も短い場合が多いと考えられるため、人工島の外郭を保護する防波護岸の設計上の重要度を適切に設定することが必要である。そしてその重要度に基づいて決められる地震・波浪などの外力条件に基づき、適切な防波護岸の構造形式の選択、合理的な耐

震・耐波浪の評価法ならびに安全評価基準の設定により人工島式原子力発電所の護岸としての合理的設計法を確立する必要がある。

### 1-5-3 人工島周辺の波、海浜流、海浜変形に与える影響評価法の高精度化

人工島の建設は周辺海域の波、海浜流に大きな影響を及ぼすだけでなく、砂の移動により周辺の海岸や海底の地形変化を引き起こす可能性がある。したがって、建設計画立案時にこれらについて十分な評価を行い、それを人工島と陸の間の静穏海域など周辺海域の利用計画に反映させるとともに、必要に応じ海岸変形に対する事前の対応策をとることとなる。波、海浜流、海浜変形については既に開発された評価法があるが、上記の目的に十分応えるためにはさらに信頼性を上げ、長期にわたる海岸変形の評価を行えるよう高精度化を図る必要がある。

### 1-5-4 立地支援技術

発電所の立地計画に際しては、発電所と地域住民との共生が求められることになり、それを実現するための手段として立地支援技術が位置づけられる。発電所の立地に伴うエネルギー、空間、付属施設などに着目すると、立地地域には莫大な資源が与えられることになる。これらを有効に活用することで非立地地域にはできないような地域発展が可能となるはずである。特に、人工島立地の場合、例えば人工島背面に形成される静穏海域の活用など、多様なサイト資源を活用することが可能である。そのためには、発電所構内の緑化や藻場造成に関する技術、砂浜造成技術、温排水・熱利用技術や景観設計技術などの要素技術の開発が必要である。要素技術を集約して地域の特質を考慮した地域振興方策の創出も大きな課題と言える。