ニュークリア・フローティング・アイランド構想 に関する検討評価

村 田 浩*, 武谷 清昭*, 両 角 実**, 片山 正敏**

(1980年 11月25日 受理)

Feasibility Study on Nuclear Floating Island (NUFIS)

By Hiroshi MURATA, Kiyoaki TAKETANI,
Minoru MOROZUMI and Masatoshi KATAYAMA

Under the present oil demand/supply situation, oil consumption must be reduced in Japan, implying the reliance on nuclear energy in future. The siting for nuclear power plants is limited, however, because of the dense population; there must emerge a new concept in this connection. Feasibility of a nuclear floating island (NUFIS) has been studied. The NUFIS is located about 20 km offshore with sea depth about 150 m and has a 1,200 MWe PWR plant on a 140 m×140 m floating platform, with displacement about 298,000 t. It is technologically feasible, and the platform is stable enough to build the power plant and its associated facilities on it. It is possible to construct a nuclear floating center offshore of Japan, which comprises VHTR, FBR, fuel reprocessing and fabrication plants.

KEYWORDS: nuclear floating island, reactor sites, feasibility study, PWR type reactors, stability, nuclear power stations, energy transportation, safety

I. はじめに

わが国のエネルギー需給の状況からみて、過度の石油への依存から脱却するために、今後原子力開発の比率はますます高められなければならない。この状況の下では、原子力関連施設の設置場所の確保が重要な課題となる。例えば、わが国の原子力発電開発計画の実現を陸上のみに頼るとすると、将来立地問題点からその推進に支障をきたすおそれがないとはいえない。また、最近の情勢から、地域住民の環境保全に対する意識の向上は無視できないものがあり、そのため原子力発電所の新設に対するコンセンサスが得難い状況が続くものとみられる。

日本原子力研究所は早くから、原子力によって生産される熱エネルギーの有効利用を図るため多目的高温ガス炉の研究開発を進めてきた。これに関連して行なった多目的高温ガス炉のテクノロジー・アセスメントの中で、原子力施設の立地に関する問題の重要性を指摘するとともに、自らも立地拡大の方向を検討するため数年前から専門機関にも委託して問題解決のための具体策を検討してきた。新立地の一つの手段として原

子力施設を海上沖合いに立地するニュークリア・フローティング・アイランド(Nuclear Floating Island, NUFIS)構想に関する検討評価の結果がまとまったのでここに報告する。

II. NUFIS 構想

新立地概念としては、海上立地、沖合い立地、地下立地等がある。わが国の原子力発電所がすべて海岸立地であって海中に廃熱している現状、ならびに今後の原子力施設基地の大型化などを考え合わせると、わが国において海上立地への発展は有力な手段と考えられる。

海上の浮上プラントには次の利点が考えられる。

(1) 陸上炉のように、地形、地質、地盤による設計、建設上の制約がない。(2) 水上輸送が可能のため、現地へ輸送する場合の寸法、重量上の制限が陸上より大幅に緩和される。これらの点は、原子力プラントの標準化を可能とし、かつ大部分の建造作業が設備、人材の

* 日本原子力研究所(Japan At. Energy Res. Inst.)

** 核物質管理センター(Nucl. Mater. Contr. Center)

** 三菱重工業(株)技術本部広島研究所(Hiroshima Tech. Inst., Mitsubishi Heavy Ind., Ltd.)

整っている工場(造船所など)で行え、工期の大幅な短縮と経済性の格段の向上が図られる上に、機器の信頼性を高めることができる。さらに、(3) 地盤による直接の影響がないので、耐震設計上の制約がなくなる。

このように多くの利点を有しているため、これまでも各方面で検討が行われているが、浮上式の原子力発電所としては、米国で Offshore Power Systems (OPS) 社による Floating Nuclear Plant (FNP) の実用化が図られている⁽²⁾。FNPでは、海岸、湖岸、大河川の岸等における水深20m程度の水域に着定式防波堤を構築し、その内側に浮上プラントを置くことになっている。

これに対して NUFIS は、わが国の実情から見て沖合い(20 km, 水深100 m 程度)に原子力発電所を設置することを提案したものである。日本列島沿岸でこの条件に適合する海域を調査したが、その結果は第1図に見られるとおり、日本沿岸の70%以上が条件に合った海域である。

第1図 日本沿岸水深分布図

この立地方式については以下の利点が挙げられる。

- (1) 地域社会との離隔距離を大きくとることが容易で、社会環境への影響を少なくすることができるため、地域住民のアクセプタンスを得易い。
- (2) 大規模基地とした場合でも災害評価が有利と考えられる。
- (3) 消費地域への2次エネルギー源の輸送が比較的短距離の位置に原子力施設を設置できる可能

性がある。

この概念を発展させて NUFIS に、原子力発電所のみならず、燃料再処理施設、燃料加工施設などを設置すれば核燃料サイクルも海上プラント内で完結できる⁽³⁾。さらに軽水型発電炉のほか高速増殖炉あるいは高温ガス炉を設置する総合的な原子力エネルギーセンタ構想も提案されており⁽⁴⁾、立地問題にも大きく寄与することが期待される。上記のように、この立地方式は他と比較してきわめて優れた特色を有するものであるが、その実現のためには技術的可能性が十分に検討されなければならない。

したがって、以下に述べる手順により技術的可能性を検討した。①搭載プラントおよび立地条件などの基本条件を定める。②海上プラントとなる部分について、まず試設計を行い、次に最も厳しい海洋条件での動揺解析を行い、その結果を検討評価する。③海上プラントを一定地点に保持するための係留について試設計を行い、その能力を検討する。④海上プラントを防護するための防衛堤についても試設計を行い、その能力を検討する。⑤海上プラントにおいて生産が考えられている各種の2次エネルギー源を陸上に輸送する方式について調査検討を行い、可能なものについて試設計を行う。⑥以上述べた各項目について、今後実現を図る際に必要な課題を摘出する。

以上の検討の結果を、(1) 原子力発電施設を海洋上にある浮上式プラットフォームに設置し、これを係留することの可能性、(2) プラットフォームの防衛方式、(3) このプラットフォームから陸地への2次エネルギー源輸送方式、の3項にまとめて述べる。ここで得られた原子力発電用 NUFIS 試設計結果の概観図を写真1に示す。

写真1 原子力発電用 NUFIS の概観

Ⅲ. 海上プラントの試設計・動揺解析

1. 海洋学的設計条件の設定

海洋構造物は、海洋に設置された場合に受ける波浪などの外力を考慮して設計・建造を行う必要がある。わが国においては、海洋構造物の海洋学的な設計条件として確立したものはいまだないが、参考になるものとしては、土木学会が編集した「海洋鋼構造物設計指針(案)解説」⁽⁴⁾がある。一方、外国の基準としては、ノルウェー船級協会による基準(DNV ルール)⁽⁶⁾や米国船級協会の規則(ABS ルール)⁽⁶⁾などがあるが、これらはいずれも海洋石油掘削装置等を主な対象としている。沿岸構造物に対しては、日本港湾協会による「港湾施設の基準・同解説」⁽⁷⁾があるが、対象は水深の浅い沿岸のものである。そこで本検討にあたっては、これらの基準と米国の沖合い原子力プラントの基準を参考とし、わが国における海象、気象データを調査、参照して第1表のような条件を設定した。

第1表 設計条件一覧

項 目	状 態	電 航 時	運 転 時	非 常 時	
				暴 風 時	津 波 時
稼働水深 (m)	—	100~150	100~150	100~150	100~150
風速 V_{10} (m/s) (10min平均)	26	52	90	52	52
瞬間最大風速 V_{10}^{t1} (m/s)	30	60	104	60	60
最大波高 H_{max}^{t2} (m)	5	8	11	6	6
有義波高 $H_{1/3}^{t3}$ (m)	3	4	6	3	3
平均波周期 T (s)	5.4	6.6	8.8	5.4	5.4
波長 λ^{t4} (m)	45	68	120	45	45
潮 位 (m)	—	2	2	2	2
津波波高 (m)	—	—	—	5	5
津波周期 (min)	—	—	—	30~60	30~60
潮流 V_c (m/s)	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54
雪荷重 (t/m ²)	—	1.0	1.0	1.0	1.0
地 震	—	—	—	—	—
衝突船舶	—	—	3,000 G/T, 4 kn ^{t5}	—	—

^{t1} $V_{10}=1.15 V_{10}$, ^{t2} 連続して10,000波を観測した中の最大値

^{t3} 連続して100~1,000個の波を観測したうち大きい方から

1/3と上げた波の平均値, ^{t4} $\lambda=(g/2\pi)T^2$

^{t5} 3,000グロストン(G/T)の船が4ノットで衝突

2. 海上プラントの試設計

(1) プラント搭載方式の選定

海上プラントの基盤となる部分については、着底型、甲板昇降型、船型およびバージ型、半潜式型などがあ。これらの中から、①設定水深に適し、かつ地震動に

対して有利であること、②大重量の原子力プラントを搭載するのに適した形状および係留方法がとやすいこと、③波浪中での動揺安定性が優れていること、などの理由から浮体構造の形式としては半潜式プラットフォームを選定した。

(2) 搭載原子力プラントの主要仕様

海上プラントとして搭載する原子力施設は諸元のわかっている既存の原子炉施設の中から最大規模の出力を持つ加圧水型原子力発電所(PWR)とした。PWRは動揺に対する炉心の性能が優れ、原子力船の動力源としても用いられており、現時点では海上原子力発電所用の炉として適していると考えられる。

本調査では、わが国における標準型 PWR を基にし、米国の OPS 社の浮上式原子力プラント⁽⁸⁾を参考にして搭載プラントを設定した。設定した原子力プラントの主要項目は次のとおりである。

原子力プラント型式: PWR

出 力 : 約1,200 MWe

原子炉格納容器 : 外径46m×高さ73m

搭載基数 : 1基

重 量 : 171,400 t

(3) 原子力プラントおよび浮体構造物の試設計

海上プラントの浮体となる半潜式プラットフォームは、海面下にあって浮力を持たせるためのマット、原子力プラントの大部分が載せられるデッキ、ならびにマットの上にあってデッキを支えるコラムおよびブレースからなるトラスドローメン構造である。これらの主要寸法は次のとおりとなった。

長さ×幅×高さ: 140m×140m×28.5m(デッキまで)

マット : 140m×140m×13m

コラム : 20mφ 12本, 10mφ 3本

格納容器保護コラム: 50 mφ

復水器保護コラム : 40m×15m

ブレース : 2 mφ

全体構成の検討に際しては、面積は小さく全体の重心が低くなるように、また重量の大きなもので分割可能な部分(炉心構造、タービン復水器等)はできるだけマット上に配置するように配慮した。1例としてプラント建屋の概略配置を第2図に、側立面図を第3図に示す。このプラントの運転時静的安定性の評価結果を第2表に示す。

3. 波浪中における動揺安定性

海洋における波は実際には不規則な現象をしており、大波高の下での浮遊構造物の動揺や構造物に加わ

第2図 海上原子力発電所建屋概略配置図

第3図 NUFIS 試設計図(後側立面)

る加速度を正確に求めることは難しい。これまでの解析法は、規則波中の応答をもとに線形・重ね合せによる統計理論⁹⁾によっている。ここでは、現在一般的に用いられている方法として、まず規則波中の応答関数を求め、設置海域での波スペクトラムを用いて確率・統計論的に解析を行なった⁹⁾。本試設計プラントの各状態における動揺と加速度の解析結果のうちロール、ピ

第2表 運転時(吃水18.5m)静的安定性能値

項 目	縦方向	横方向
排水量 (t)	298.200	
吃 水 (m)	18.5	
トリム・ビール (m)	0.0	0.0
水線面積 (m ²)	6.569	
毎センチ排水量 (t/cm)	67	
浮面心位置 (m)	-4.60	0.31
浮心位置 (m)	-0.57	7.65
重心位置 (m)	-0.57	0.038
浮心・重心間距離 (m)	22.61	
メタセンタ高 (m)	45.48	46.50
修正後のメタセンタ高 (m)	22.87	23.89
自由水による重心修正 (m)	1.0	1.0
修正後のメタセンタ高 (m)	21.9	22.9
毎センチトリムモーメント (tm/cm)	466	488
固有周期(s)	{ 上下動 23.2 縦揺れ 35.1 横揺れ 35.7	

ッチについて、風、潮流、漂流力などによる静的傾斜も含めた結果を第3表に示す。また、気象、海象による最大回転角および格納容器に加わる最大加速度をまとめたものを第4表に示す。参考までに、米国 OPS 社の海上プラントの設計基準を()内に示してある。これらの値から、本プラントの動揺は非常に小さいといえよう。また、海象の非常時に原子炉に加わる最大加速度は、わが国の陸上原子力発電所が最大級地震の加速度を0.3G程度に設定している状況からみると、それより1桁近く低い値である。海上プラントの全体規模を更に大きくすると、動揺に対する固有周期をより大きく、プラントの回転角をより小さくすることが期待できる。しかし反面、海上プラントの建造費の増大をまねくことになるので、本格的な設計を行う際にはこれらを含めた系統的な詳細検討が必要である。

第3表 各状態における回転角

(単位: deg)

項 目	運 転 時	非 常 時	
		暴 風 時	津 波 時
ロー ル			
平均値 ϕ_{mean}	0.32±0.22(0.1 ~0.54)	0.97±0.67(0.3 ~1.64)	0.32±0.09(0.23~0.41)
有義値 $\phi_{1/3}$	0.32±0.34(-0.02~0.66)	0.97±1.07(-0.1 ~2.04)	0.32±0.15(0.17~0.47)
最大値 $\phi_{1/10,000}$	0.32±0.76(-0.44~1.08)	0.97±2.37(-1.4 ~3.34)	0.32±0.33(-0.01~0.65)
ピ ッ チ			
平均値 θ_{mean}	0.32±0.21(0.11~0.53)	0.07±0.71(0.26~1.68)	0.32±0.08(0.24~0.40)
有義値 $\theta_{1/3}$	0.32±0.34(-0.02~0.65)	0.97±1.14(-0.17~2.11)	0.32±0.12(0.20~0.44)
最大値 $\theta_{10,000}$	0.32±0.74(-0.42~1.06)	0.97±2.53(-1.56~3.50)	0.32±0.27(0.05~0.59)

第4表 回転角, 加速度の最大値比較

項 目	運 転 時	非 常 時	
		暴 風 時	津 波 時
回転角 θ (°)	1.08 (2.00)	3.50 (2.00)	0.65 (2.00)
加速度(G)			
サージ方向	0.05 (0.05)	0.07 (0.17)	0.03 (0.10)
スウェイ方向	0.05 (0.05)	0.07 (0.10)	0.03 (0.10)
ヒープ方向	0.02 (0.05)	0.04 (0.10)	0.01 (0.10)

↑ ロール, ピッチのうち大きな方を示す。

() 内数字は OPS 社基準による。

4. 係留装置の検討

浮遊式海洋構造物を一定点に保持しておくためには, 一端を海底に定着した係留索を用いる場合が多い。このような係留システムは海洋石油掘削装置, 海上作業台, 海上都市など, 定位置を保持することが要求されるものに用いられているが, 年々規模が大型化し, かつ稼動水深も増大している。しかしながら, これらのものは本検討対象である海上プラントより規模はるかに小さい。そこで現在の技術で海上原子力プラントが係留し得るかを主体に検討を行なった。

(1) 設計基準・条件の設定

浮遊式海洋構造物の係留システムに関しては, 従来, 船級協会等の技術基準にも詳細な規定がなく, メーカー各社が過去の経験や実績に基づいて独自の設計基準を定めているのが実情である。海上原子力プラントでは, 原子力施設であるために厳しい安全性が要求されることから, 係留システムについても一般の海洋構造物より厳しい要求がなされるものと考えられる。ここでは, とりあえず, 一般の海洋構造物に適用されている設計基準を参考とし, 係留索の破断強度に対する安全率を, より厳しい値にとって設計を行なった。設定した基準値を第5表に示す。

(2) 解析法

係留システムの解析は, 非線形問題として取り扱う必要があるため非常に煩雑となるので, 一般に次の手順がとられている。① 係留ラインの浮体側端部での変位と反力の関係を求め, 係留力を等価バネ系に置換する。② 等価バネ系に置換された係留特性を持つ係留浮体の運動を解析する。③ 上記解析により求めた係留浮体の運動振幅, 位相を係留ラインの端部に作用する強制振動として与え, 非線形な係留ラインの解析を行う。

また, 係留ラインの解析に当たっては, 一般に風や潮

第5表 海上原子力プラントの構造物の係留システム設計基準

項 目	状 態	非 常 時	
		運 転 時	暴 風 時
プラント構造物の操船 (位置・張力・調整)および安全のための係留索 余長(m)		200	200
プラント構造物の許容水平移動量		特に設定しない。	
錨索の破断強度に対する安全率		3.5 (2.8)	2.4 (1.7)
アンカー持上り角度(°)		0	ほぼ0
アンカー/シンカーの走錨		不可	不可

(注) 係留ラインの初期張力は, プラント構造物の水平移動量が水深の10%の時, 錨索の破断強度に対する安全率が2.0となるよう設定する。

() 内の値は一般海洋構造物の設計基準例。

流等の定常外力に対する静的解析と, 波浪等の変動外力に対する動的解析とを個別に行い, 結果を線形重畳する方法がとられている。静的解析には要素分割法⁽¹¹⁾, 動的解析には有限要素法⁽¹²⁾⁽¹³⁾を用いた。

(3) 係留方式の選定

チェーン方式, ワイヤ・チェーン複合索方式, 中間シンカー, 中間ブイ方式など各種係留方式について比較した結果, 曳船・据付けの作業性もよく, 経済性に優れ, 実績も多く信頼性が高いことから, チェーン方式を最適なものとして選定した。その主要目を第6表に示す。

第6表 係留システムの主要目

チェーン要目	
本 数	32
呼び径	203 mm (8")
索 長	770 m (余長200 m 含む)
重 量	0.92 t/m (空中), 0.86 t/m (水中)
Grade/破断強度	Grade 3/2, 287 t
シンカー要目	
個 数	32
主要寸法	7 m 長 × 7 m 幅 × 4 m 厚
重 量	390 t (空中), 190 t (水中)

なお, 先に試設計を行なった海上プラントにこれらの係留索を装着して, プラント設置点まで曳航し, 係留させる操作手順についても検討した結果, 充分可能であることがわかった。(写真2参照)

5. 今後の課題

(1) 海洋学的条件の設定

基本となる沖合いでのデータを蓄積することが主な課題である。特に波浪, 風速については実測データを集め設計の基本となる考え方を確立する必要がある。

写真 2 NUFIS 係留ライン布設作業想定図

(2) 原子力プラント関連事項

(1) 今回の設計条件下では、プラットフォームの動揺に対する応答は浮遊式海洋構造物としてはかなり優れたものであったが、原子力プラントがこの動揺で充分健全であるかを検討するまでには至らなかった。この面での検討を加える必要がある。

(2) 原子力船で考えられている沈没対策についても考慮する必要がある。ただし、これにはプラント内での想定事故による場合や船舶の衝突による場合などを考慮し、プラント本体、浮体構造物、さらに防衛堤も含めた総合的な検討を行う必要がある。

(3) プラットフォーム関連事項

(1) ここでの衝突対策は浮防衛堤に持たせることとし、本体は衝突について検討を行っていない。船の衝突の可能性の確率的評価を行い、浮防衛堤の機能との兼ね合いで、プラットフォームにどの程度の防衛機能を持たせるかを明確にする必要がある。

(2) 長期健全性の確保についても、実証試験を含む十分な検討が必要である。船の場合は定期的にドックに入って検査されているが、本構想のような大規模なものでは、運転開始後ドックに戻すことは非常に難しいと考えておくべきである。現地での定期点検、補修を設計の段階で考慮しておくべきである。

(3) 本構想のような海上プラントは規模が大きいほど有利となることは論を待たない。規模の拡大としては今回の試設計の結果と同程度のものを結合していく方法と、単一の浮体をスケールアップしていく方法とが考えられるが、いずれを採用するのが妥当かについては係留装置も含めた詳細な検討評価が必要である。

(4) 係留関連事項

(1) 海上原子力プラントとして、合理的強度計算に適合した安全率を設定することを含む設計基準の確立が必要である。このためには、一般の海洋構造物に関

する基準等も参照し、基準の確立に必要な鎖の疲労強度および腐食に関するデータを蓄積する必要がある。

(2) 係留システムの合理的設計を行うには、係留ラインに加わる張力頻度や疲労の解析を行なって正しい寿命推定をすることが必要である。そのための中心となる動的解析法を確立することが望まれる。また、それに必要な、規則波中と不規則波中における動揺および係留力に関する実験データをとる必要がある。

(3) 係留索が強力であっても、この一端を海底で固定、保持させるシンカー/アンカーの保持力(把持力)が大きくなないとプラントは移動する。大きな把持力を持ち、かつ経済性の良いシンカー/アンカーを開発することも望まれる。

Ⅳ. 海上プラントの防波・防衛

1. 防波堤、防衛堤の意義

海上原子力プラントに防波堤・防衛堤が必要であるか否かについては意見が分かるところである。防波・防衛に関しては次のような対策のどれかがとられればよいと考えられる。①専用の築堤を構築する。②本体(浮体構造物)の設計・建造の中で対処する。③上記①と②を併用する。

OPS 社の浮上式原子力プラントでは、一般的な着底式の防波・防衛堤がめぐらされることになっているが、ここでは水深が20m程度の水域を想定しているため建設に大きな支障はない。一方、本検討プラントは水深100~150mの海域を設置点と想定しており、着底式の防波・防衛堤を構築することは技術的には可能であっても、経済面から現実的とは考えられない。

本検討プラントと同様、あるいはさらに大きな水深の海域で使用される海洋石油掘削装置では防波・防衛のための築堤はなく、防衛は本体の設計で考慮することになっている。また当然のことながら、原子力船に

においても防波・防衝堤はないが、船の原子炉室側部がしかるべき耐衝突構造となっている。

そこで、海上原子力プラントに防波・防衝堤をつけるか否かは、今後詳細な検討の後に決定されるべきものとし、ここでは次のような条件を前提として防衝堤の試設計を行なった。① 浮体(プラットフォーム)の耐波浪性は、第Ⅲ-3節の結果に見られるとおり、良好であるので、防波のための築堤は必要ないとする。② 衝突防止のための防衝堤は必要と考える。ただしこれは、数の多い小型船舶に対処するとともに、大型船舶衝突の確率は非常に小さいものと考え、防衝堤のための設計条件は第1表の値を用いる。設計条件をこのように定めると、防衝堤を浮上式にすることが可能となる。以上の前提を基に、浮上式の防衝堤について技術的検討評価を試みた。

2. 浮防衝堤の型式選定, 規模の検討

浮上式の防衝堤としては、逆T型、ボンツーン型や着底式との折衷型ともいべきカーテン型等が挙げられる。ここでは、水線面積が大きくとれるため同一重量のものとしては復元力が大きいボンツーン型を採用した。浮防衝堤については、日本海洋開発産業協会が石油の海洋備蓄に関連して検討しているが、同会の研究報告書⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾によれば、浮防衝堤の規模は対象とする衝突船舶、吸収エネルギー等と密接な関係があり、浮防衝堤の規模と衝突力および水平変位とは次のような関係にある。

浮防衝堤質量(M_0)/衝突船質量(m_0)が1/3以上では衝突時に防衝堤に加わる力のピークは1回だけで、 M_0/m_0 が大きくなるに従って衝突力は大きく衝突継続時間は短くなる。 M_0/m_0 が1/3以下になると衝突力のピークは2回以上現れ、水平変位は大きくなるが復元が早くなる。2回目以降のピークは浮防衝堤に作用する減衰力および復元力によるものである。衝突力のピークは M_0/m_0 が小さくなるに従い浮防衝堤に作用する減衰力と復元力によるピークが大きく、いわゆる「柔らかく」なる現象を示すが、この比があまり小さくなりすぎると浮防衝堤の水平変位や回転変位が増大し、また連結する個数の増大に伴う経済性の悪化等も生ずる。これらの結果から、前出の報告書では M_0/m_0 を1/5程度とすることを推奨している。そこで本検討でもこれに準ずることとした。

3. 浮防衝堤の試設計および解析

3,000グロストン(満載排水量7,000t)級タンカーに対して排水量が1/5程度の小判形ボンツーン式の浮防衝堤を試設計した。近海におけるタンカー事故を念頭

に置き、ボンツーン間の結合部にはオイルフェンスを設けた。また、規則波中の動揺計算の結果、当然のことながら、プラント本体と比較して固有周期は5~6sと小さく、動揺性能は劣る。これを改善するには規模の増大が考えられるが、これも衝突に対して必ずしも有利ではなく、今後は構造面での配慮などで改善を図ることになろう。結果は第4図に示す。また、前出の報告書により検討した結果、波周期6s以上のものは消波効果がほとんど期待できないことがわかった。

第4図 浮防衝堤配置図

船舶衝突時の挙動を解析した結果の概略は次のとおりである。

衝突のエネルギー: $E_0 \approx 2 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{m}$ (総トン数
3,000tの船が4ノットで衝突)

最大衝突力: $F \approx 900 \text{ t} \cdot \text{m}$

最大水平移動量: $x \approx 5.9 \text{ m}$

連結部伝達力: $F_e \approx 140 \text{ t}$

ロール角度: $\theta \approx 36^\circ$

4. 今後の課題

以上の結果、海上原子力プラント本体を防護する堤としては、①周期の大きな波に対する防波効果は期待できないが、②数の多い小型船舶に対する防衝効果は充分期待できることがわかった。しかしながら、本防衝堤についてはかなりの建造費となることが予想されるにもかかわらず全船舶の衝突を防ぎきることはできない。したがって、このような規模の浮防衝堤が必要であるか否かについては今後詳細な検討が必要である。船舶衝突の確率評価を充分に行い、その結果を基に海上原子力プラントの防衝機能はどうあるべきかを

定め、防衛堤は必要か否か、必要ならその能力はどの程度とすべきかを定めるべきである。その際には、一般の海洋構造物さらには原子力船の設計基準・安全基準等との整合性も考慮する必要がある。

V. 2次エネルギー源の輸送方式

1. エネルギー輸送方式

原子力施設海上立地の際には、その構成および規模をどの程度にするかも大きな課題のひとつであるが、スケールメリットを生かすために、その規模は大きくなると予想される。また、これらの海上施設としては、軽水型発電所のみならず、現在開発中の多目的高温ガス炉やその他の施設を含む原子力エネルギーセンター⁽⁹⁾を設ける可能性もある。現在、多目的高温ガス炉において生産し得ることが考えられている電力以外の2次エネルギーは、石炭のガス化・液化による流体燃料⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾と水の熱化学分解による水素⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾である。原子力エネルギーセンターの海上立地の場合、そこで生産される電力や気体・液体燃料といった2次エネルギーを陸地には送電ケーブルやパイプラインが用いられ、それらは海底に布設されることになる。流体燃料については船舶による輸送も考えられるが、沖合20 km以内という立地点を考えると、よほど遠方の消費地に輸送するのでない限り、パイプライン輸送が妥当である。このような理由から、海底ケーブルによる電力輸送、および海底パイプラインによる流体燃料輸送の2つについての技術的可能性についても調査、検討を行なった。検討に先立って輸送量を設定する必要があるが、ここでは、現在の最大出力規模の炉で生産される量を仮定した。

2. 海底送電ケーブル

海上プラントで生産される電力量を最大規模の軽水炉と同様の120万kWとすると、1回線で送電するには500 kV, 2,000 mm²程度のOF (Oil-Filled) ケーブルが必要と考えられる。現在実績のあるものは500 kV, 800 mm²程度であるが、メーカーでは大口径ケーブルの開発が進められており近い将来、実用化が期待される。また海底への布設についても、大口径のケーブルを深さ100 m以上の海底に布設した実績はないが、深さについては69 kV, 250 mm²のものをセントローレンス川の最大水深366 mの場所に布設した例もあり、技術的に対処し得る範囲と考えられる。

3. 海底パイプライン

多目的高温ガス炉で生産される2次エネルギーについては、炉の出力規模を300万kW_{th}として生産量を試

算した。その結果、水の熱化学分解による水素ならびに石炭の水添ガス化による合成天然ガスの生産量は約1×10⁷ Nm³/dと算出された。同様に、石炭の液化による液体燃料の生産量は2.4×10⁴ kl/dと算出された。現在、天然ガスの海底パイプライン輸送については、ガス輸送量3.7×10⁷ m³/d、パイプ径32 in.、最大水深100 m、輸送距離378.4 kmといった実績⁽²⁰⁾があり、第7表に示す程度 of ガス輸送については製造、布設とも技術的に可能な範囲である。なお、液体燃料の輸送について試設計を行なった結果では、口径30 cm程度のパイプが必要となるが、石油の海底パイプライン輸送において口径36 in.、最大水深152.2 m、輸送距離169 kmといった実績⁽²⁰⁾があり、液体燃料の輸送についても製造、布設とも可能な範囲である。

第7表 SNG 用パイプラインの諸元

項 目	フレキシブル パイプ	海底パイプ ライン
諸 元		
選定品名	高圧ゴム ホース	STPY-26 相当品
耐 圧 (kg/cm ²)	70	約50
外 径 (mm)	354	約698
内 径 (mm)	298	約638
所要数	5 系統	1 本
ガス輸送特性		
ガス温度 (°C)	40	上流入口 40 下流出口 15
ガス輸送速度 (m/s)	8.86	上流入口 9.67 下流出口 8.89
ガス圧力 (kg/cm ² ・a)	40	上流入口 40 下流出口 40
ガス体積流 (m ³ /s)	3.09	上流入口 3.09 下流出口 2.84

注 ガス輸送量: 9.3×10⁶ Nm³/d, ガス成分: CH₄

4. 海上プラントとの接続

海底に静止しているパイプラインまたはケーブルと、海上で動揺しているプラントとを接続させるには、両者の相対的な変位量を吸収させる機構が必要となる。現在、このような変位に追従し得るだけの可撓性と長期間の使用に耐えるだけの耐久性とを兼ね備えたケーブルやパイプは開発されていない。したがって、可撓性を持たせる部分は、点検、保守および交換の可能なことが要求される。接続法について、上記条件を満足させ、かつ信頼性も高いものとしては、海上プラントの近くに海底から海上までの固定やぐらを建て、可撓部を海上に置く方式が最も適すると考えられる。

以上の、電力または流体燃料を陸上に輸送するについて、現在の技術で可能と考えられる方式の概念を第5図に示す。

5. 今後の課題

以上の結果, 2次エネルギーの海底ケーブルおよび海底パイプライン輸送に関する技術的可能性についても見通しは得られたが, 実現に際しては以下に述べる課題を解決してゆくことが必要と考えられる。

(1) 海上プラントと海底静止部との接続法

本検討ではやぐら方式によって問題点の解決を図ったが, 海底静止部から海上プラントまでを可撓性のあるラインで接続できるなら建設コストも大きく低減されよう。このためには, 金属性で耐久性が高く, かつ可撓性も持ったパイプの開発, 大水深での点検および交換の方法の開発が望まれる。

(2) 保安技術

保安技術は大部分陸上のものが使えるが, さらに, パイプラインの監視システム, 破損に対する補修法の開発が望まれる。

Ⅶ. あとがき

NUFIS の構想に関する技術的検討評価を行なった結果, 以上のように, その技術的可能性についてはほぼ見通しを得た。すなわち, 浮上式プラットフォームに100万 kW_e クラスの PWR 型原子力発電所を設置することの技術的可能性が明らかになり, さらにそれを発展させた海上原子力エネルギーセンター構成のために必要な係留方式, 防衛堤方式およびエネルギー輸送方式について, さらに日本列島の沖合い20km 程度, 水深150 m 前後の海洋に設置することの技術的見通しも得られた。しかしながら, 技術的可能性が見出されたからといって, 直ちに NUFIS の基地構築の設計・施工が可能ということではなく, さらに設計手法の確立, 海象条件に関するデータの充実などが必要であり, 波浪試験なども実施することが必要であろう。そのためこれらを含めた総合的開発体制も樹立されなければならない。NUFIS 方式による原子力エネルギーセンター構想の実現には, なお多大の努力の積重ねが必要であるが, 日本の将来の長期的エネルギー供給問題を直視するならば, その実現への道を強力に切り開く努力が求められよう。

第5図 パイプライン(または海底電線)による2次エネルギー輸送方式

—参考文献—

- (1) 村田 浩, 武谷清昭, 両角 実: JAERI-M 8559, (1979).
- (2) DOCKET-STN-50437-1, (1975).
- (3) MURATA, H.: *J. Brit. Nucl. Energy Soc.*, 15, 111 (1979).
- (4) 土木学会編: 「海洋鋼構造物設計指針(案)解説」, (1973.8.).
- (5) Det Nonske Veritas: "Rules for the Construction and Classification of Mobile Offshore Units", (1973).
- (6) Amer. Bureau of Shipping: "Rules for Building and Classing Offshore Mobile Drilling Units", (1973).
- (7) 「港湾施設の技術上の基準・同解説」, (1979), 日本港湾協会.
- (8) ECR 日本委員会波浪委員会編: 「海洋波浪の調査研究に関する現況報告」, (1974.11.).
- (9) 日本造船学会: 耐航性に関するシンポジウム, (1969.7.).
- (10) SKOP, R.A.: The method of imaginary reactions application to N-point moors, *Marine Technol.*, 6th Annu. Conf. Marine Technol., p. 1~20 (1970).
- (11) DOMINGUEZ, R.F., FILMER, R.W.: Discrete parameter analysis as a practical means for solving mooring behavior problems, OTC 1505, (1971).
- (12) WEBSTER, R.L.: Nonlinear static and dynamic response of under-water cable structures using the finite element method, OTC 2322, (1975).
- (13) 片山正敏, 他: 浮遊式海洋構造物の係留解析法, 三菱重工技報, 13(4), 133 (昭51.7.).
- (14) 「昭和48年度石油の海洋備蓄システムの技術的検討に関する調査, B-3浮防衛堤の船舶衝突防護特性に関する実験報告書」, (1974.3.), 日本海洋開発産業協会.
- (15) 「昭和50年度石油の海洋備蓄システムの技術的検討に関する調査, 浮防衛堤の総合模型による基礎実験報告書」, (1974.3.), 日本海洋開発産業協会.
- (16) Van HECK, K.H., et al.: Gasification of coal with special regard to the utilization of nuclear energy, *Int. Symp. on Energy Sources and Development, Barcelona, Oct. 19~21, 1977*.
- (17) RICKARD, C.L., QUAD, R.N.: The HTGR in coal processing application, *Seminar on Nuclear Process Heat, KFA Jülich, Nov. 19, 1973*.
- (18) MARCHETTI, C.: *Chem. Economy Eng. Rev.*, 5, 7 (1973).
- (19) 佐藤章一: 原子力誌, 18(11), 685 (1976).
- (20) *Offshore Engineers*, p. 124 (1978).