展 望

海 洋 情 報 都 市*

寺 井 精 英**

Ocean Communications City*

by Kiyohide Terai**

キーワード：海洋建築構造物，高度情報都市，海上空港，
ACT 構造物，層上空間分離型多機能都市

1. 重工業界を取り巻く環境

造船業が不況をかこっている。いまや慢性的となった世界的な海運市況の低迷。過剰生産設備がもたらす内外の過当競争。そして限られた発注量を奪い合うために生じる船価の落ち込み。加えて、造船業の将来をますます絶望的にするのは、一連の発展途上国、地域による国際的な新興造船勢力の追い上げである。そして最近の異常な円高による輸出力の大幅な減退が追い打ちをかける。

建造量も85年の540万総トンから、87年では330万総トン（予想）と急激に低下している。一時は2千万総トンの生産能力を誇示したことがまるで夢のようだ。こうまで悪条件が重なって、しかも現実に経営の見通しが悪化すれば、かつては重工業界を代表した造船業も命運尽きたかの感がある。しかし果たしてそうなのか。現在は少なくとも絶望的にみえる造船業に起死回生の妙薬はないのであろうか。

1960年代に入って間もないころにも一度、構造的な危機の訪れたことがあった。世界的に経済成長の波が高まり、日本にモータリゼーションの時代が始まろうとしたところのことである。造船業は新興の組み立て産業である自動車工業の急成長に押されて斜陽化し、一時は第2の石炭産業となるかとうわさされたものだ。

この衰退から造船業を救ったのはほかでもない、真藤恒日本電信電話社長（当時石川島播磨重工業船舶事業本部長）の提唱した巨大船理論である。世界の海運・造船界がこの卓説を受け入れ、そして実施した。海運界に新たなニーズが喚起され、これが当時の経済成長の波にうまく乗った。結果的に造船界の直面した危機は避けら

れ、活性化のインパクトは重工業界全体に及ぶに至った。

しかし、昨今の造船業の不況にはただならない気配が感じられる。不況対策といえば、つねに業界の集約とこれによる生産調整を中心としてきた海運・造船審議会の主張も、今回ばかりは消極策の誘いは免れまい。しかもこのこと自体、世界が成長し人口が増大する時代の解決策としては、矛盾をもたらしものなのだ。ではここにはかつての巨大船理論にみられるような次世代技術の指向による積極的な解決策はもはや望むべくもないのであろうか。

2. 未来社会のあり方

いま具体的な解決策を提示するまえに、新しい発想を生み出す母体となる未来社会とはいかなるものかについて考えてみたい。

さて文明開化の発展過程には次の2つの逆説的な現象が認められる。そのひとつは「交通機関が発達してその移動速度が上れば上がるほど、人びとの日常生活は忙しくなる」ということである。江戸時代の人はどこに行くにも歩いて旅行した。明治に入って全国に鉄道網が敷かれる。歩くより汽車ははるかに速い。例えば東京―大阪間の往復は歩けば1カ月、汽車なら2日。一度の往復で4週間の日数が浮く。従って汽車を利用することにより人びとの余暇時間はぐんと増えるはず。ところが事實はさにあらず。文明の利器が発達すればするほど人びとは忙しくなる（仕事量を一定とすれば正論が成り立つのであるが）。

次に二番目の現象。情報交信（例えば電話）のシステムが発達すると人びとはもはや移動の必要がなくなるといふ。アルビン・トフラーの電子住宅のアイデアはINS（高度情報通信システム）を前提として、以上の観点に基づいて提唱された。ところが実際には、「情報交信の

*原稿受付 昭和62年10月19日

**正 員 電気通信大学 Member, Univ. of
Electro-Communications

便利さが行きわたるほど、人びとは反対に活発に動きまわる。より創造的な、そしてより高度な知識と知恵を求めて、これが第二の逆説的現象である。

以上2つの逆説的現象をまとめて考える。今から15年後の今世紀末までに、世界中に光ファイバーと宇宙衛星による通信網が張り巡らされ、またオフィス、家庭のいづこを問わず各種の端末機が設置され、情報交信の便がいきわたる。一方、交通網の方も発達し、磁気浮上列車や磁気推進高速艇、はたまた超音速航空機と陸海空の乗り物のスピードはますますアップされる。人びとの動きは活発となり、超多忙社会が現出される。

以上の未来社会を指向するのに大陸間を短時間でつなぐ超音速旅客機(SST)の就航は不可欠の条件である。筆者らのグループはこの観点に立脚して85年1月22日、経団連会館においてパネル討論会を開催したが、その目的はもしSSTの全面的就航が必要であるならば、東京の場合には騒音公害を考慮して東京湾外に海上空港の建設が必要なのではないかという点にあった。

そしてそのわずか10日後にNASAよりマッハ12で5百人乗りの大型極超音速機(HST)を向こう15年間で開発し、ロサンゼルスー東京間に就航させるという構想の発表があった。まさにわれわれのパネル討論会の正当性を裏づける指向といえる。

この構想は86年2月のレーガン大統領の年頭教書で一段と前進し、新オリエント急行(NOE)の名のもとにマッハ数は25と倍加、開発期間は10年と前回発表の3分の2に縮められた。就航する空路はワシントンD.C.ー東京の両首都間で、片道2時間というからまさに超多忙社会にピッタリの計画である。この米国の次世代技術の開発に関連する海上国際空港の建設を念頭において、では日本の重工業界の技術力を結集する次世代技術とはなにか。ここに筆者の提唱する海洋情報都市の構想が生まれることになる。

3. 海洋開発の現状

海洋情報都市構想を述べるにあたり、まず海洋開発の現状に触れてみたい。

3.1 海洋開発の集点

海洋開発とひとくちに言ってもそれには目的によっていくつかの分野が含まれる。海底下の石油や天然ガスの掘さく、同じく海底下の鉱物資源の採取、海洋の持つ自然エネルギーの有効利用、海洋牧場の設定による水産業の効率化・活性化など。これらの各分野において海洋に関心を持つ世界の各国は、いずれも大体のところそれぞれに共通した動機と方法を持っている。ただしただ1つ

の例外がある。それはここに述べる海洋空間の有効利用に関してである。

海洋空間。これを大別するとウォーター・フロント(水際)、沖合人工島(埋め立てによる沿岸の土地造成)、そして最後に洋上空間作りの3種がある。水際にしても沖合にしても海辺に土地を作ろうとするのは費用が高む。生半可な動機では造成にかかることはできないはずである。それを敢えて踏み切るにはそれ相応の動機があるからだ。そしてこれには造成する位置になんらかの魅力があるという情報価値中心的な考えを動機とするものと、陸上の空間に余裕がないから海上に空間を求めるという単なる物的価値としての土地作りを動機とするものの2つがある。もっとも実際の場合、この両因子がある比率の下に絡み合って動機づけがなされる。

また世界的に海洋空間利用の実施例のほとんどすべては前記三者のうち前二者、すなわちウォーター・フロントと沖合人工島の形のものに限られている。欧米ではヨットハーバーや水上アパートを中心にしたエグゾティシズムを売り物のリゾート環境作りを目的とした傾向が強い。浮体構造に潮流の力を加えて水平方向にゆるやかに回転させ、アパートからの眺望を朝夕で変化させようといった類いのものまで含まれている。

日本の場合も比較的初期のものには段米の先例に追従してこのようなリゾート環境作りのムードが強かった。それがこの数年間、東京周辺における地価の異常な値上りに影響されて急速に変貌しつつある。

これに代わって台頭してきたのが産業社会の将来のニーズを先取りしようとする実利集約性の高い計画である。しかもこれらのいずれもが、最近の貿易摩擦の結果高められてきた「内需拡大」と「社会資本の整備・充実」のムードに乗っている。

3.2 新しい海洋開発の時代

昔は空中になんらの支柱なしに橋やワイヤーを架設したり、土台を構築せずに住宅を建設することなどは到底不可能なことを考えられた。「架空の話」とか、「空中楼阁」というのは現在あまりよい意味には使われていない。ひやかし半分の夢物語というような意味の表現に使用される。しかしこれらの表現の意図するものはそろそろ書きかえられなければならない。

SPS(サテライト・パワー・システム)の太陽電池の支持構造は、キロメートルを単位として作られるトラス構造で、陸上でみられる橋を巨大化したものと考えてよいし、スペースコロニーやスペースラボに至っては空中楼阁そのものといってもよい構造だからである。このように例えばロケットやラムジェットエンジンを推力とする宇宙

飛翔体の技術の進歩が、私たちの認識や使い慣れてきた言葉の意味までもを変えつつあるのだ。いわば科学技術の進歩が私たちが常識とする理念の世界を覆そうとする時代がやってきている。

3.3 海洋建築構造物の概要

現在の海洋開発にはニーズと周辺状況に応じて各種の空間設営の方法が考えられている。例えば海洋・海底資源の開発、利用と海洋空間の有効利用とは同じ空間設営を目的とする場合でも、構造物の型式・種類は大きく異なる。さらにそれぞれが水深の大小によってもまったく異なった様相を示す。ここではまず海洋建築構造物全般について概略の状況を述べておきたい（表1参照）。

4. 海洋情報都市

4.1 海洋情報都市を支える独創的技術

筆者がここで提唱する海洋情報都市とは、先に述べたACT構造を用いた鋼鉄の基盤体からなるものであるが、構造、機能、工作の各面において3つの技術上の独創性をもっている。以下それぞれについて述べてみよう。

(1) ACT的機能を持つ世界初のメカトロ構造物

まず、この都市の基盤体が世界で最初に考えられたメカトロ構造物であることだ。ふつう一般の構造物はいったん作られて使用状態におかれると、あとは外力がかかるに任される。そして構造物はその耐久力の続く限り放置される。ところがこの都市の基盤体は、外力の大小に応じて所定の形状、位置を維持するべく機能が作動するのだ。

いわば前者が死に体的かつ無機的であるのにくらべ、後者は生き物的であり有機的である。航空機分野に誕生したACT（能動制御技術）という新しい設計技術の概念に基づく一種のCCV（制御優先性形態）的機能をもった構造物と考えてよい。

具体的な構造物の全容と構造はそれぞれ図1, 2, 3に示した。都市は数層のデッキからできており、これらを一定間隔（仮に50メートルとしよう）で鋼製の柱が支える。このスパンの距離内に関する限りデッキ構造は十分な剛性をもって、それ自体とその上に乗せられた静的な負荷を支えることができる。

同様のことは支柱についても言える。支柱のそれぞれには大分な縦強度が付されており、その周辺の静的負荷により挫屈その他の損傷を受けることのないように配慮されている。つまり50メートル四方の広さの巨大な机が4本の脚でがっちりと支えられていると想像していただく。

しかしこの「机」もそれ一つだけの範囲では「がっち

り」としてはいても、これを縦横に数台ずつ並べると全体としての強度、剛性に不足を来してくる。まして数十台も並べると少々の補強ではすまないことになる。しかもこの補強の度合いは大型化すればするほど加速度的に大規模となっていく。都市としての寸法条件を満たすには、特に外洋の条件下では、考えられないほどの巨大化構造が必要となり、もはや経済的には成立しにくいものとなろう。これを補うのがCCV的構造なのである。

各支柱にはバラスト用の水タンクが内含されている。このバラストの注排水はすべて自動的に駆動するポンプとバルブにより行われる。各支柱の脚下には圧力センサーが敷設されており、これの検知する荷重の大小は常時中央のホストコンピュータに報告される。コンピュータはこの圧力センサーからの報告を受けて全体の荷重分布を描き、異常値があれば指令を出して特定支柱の自動注排水系を作動させる。もし海底面への荷重が過大であればバラストを排水して支柱の浮力を増大させ構造物の重量とバランスをとらせる。逆に荷重が過小な場合には注水して浮力を軽減させる。

このように各支柱は浮力の増減による構造物の局所的なレベル調整機能を司るアクチュエーターの役割を果たしている。以上のセンサー、コンピュータ、アクチュエーターの三者を組み合わせた機能統合はACTの典型的な特徴といえる。そしてこの方法により構造物は全体の強度になんらの不足を来すことなく、使用鋼材の重量を大幅に軽減できる。このように都市が一つの「机」を細胞の単位としてその大きさを自由にとれることは、実は予算面で大きな意義を持つ。都市はその予算に合わせてその大きさを調整できるからである。ふつうの構造物では考えられない長所的特性ではないか。

以上の機能統合は次に述べる姿勢制御を通じてCCVの用途にも結びつく。都市というからにはこの海洋構造物は平面的に大きい広がりを持っている。この点がリグなど従来の海洋構造物と大きく異なるところである。つまり横と縦の長さの比率が極めて大きい。従ってふつうなら倒壊の恐れは皆無であると考えてよい。

ところがこのように安定した構造物も台風が襲来して強い横風を受けるとなると、支柱の脚下部分は軟着底の状態であり、海底に固定されたわけではないから、構造物の周辺で風圧を強く受けた側面は捲れ上がりの現象を起こし隣接部分を次つぎとドミノ式に傾斜させ、結局構造物全体を倒壊に導く危険につながる可能性も考えられる。これを防ぐには図4に示すようにひとつは都市の基盤体の随所に大型の固定体構造を設け、基盤体を半浮遊体と固定体のハイブリッド構造にして、横方向の荷重に

表 1 海洋建築構造物の概要

構造物の種類	概 要	概 略 図
埋め立て方式	<p>海洋に空間設営を図るもっとも一般的、普遍的な構造。日本における海洋沿岸開発のはほぼ100%は、この方法によるものとみてよい。まずコンクリートまたは鋼製の矢板にて埋め立ての周辺に護岸壁を作り、その内部に土砂を投入して地固めをして土地を造成する。この方法は安価で確実なようであるが、水深が大きくなると技術的にも経済的にも問題が生じる。一般的な通説ではこれの限度は水深20メートルとされている。従って埋め立て方法の利用可能な範囲は沿岸、湾内、内海に限定されることとなる。</p>
浮体式	弛緩係留 <p>埋め立て工法では水深の点で制限がある。そこで水深に無関係な海洋空間造りをするので考えられたのがこの浮体構造である。鋼製のポンツーン(箱船)を作り海上に浮べる。その上にいろいろな構造物を建造する。この方法なら、どのように大きい水深のところにもかんたんに洋上空間を造ることができる理屈である。ただし、この場合の問題点は繫留方法にある。一般にはチェーン(錯鎖)とアンカー(碇)を海底に下す方法がとられるが、この場合各方向の各点にチェーンをつなげなければならず、またチェーンにかかるテンション(張力)が均等となるよう、つねに調整作業が必要である。</p>
	ドルフィン係留 <p>この煩雑さから逃れるには海底に塔を建て、この塔を支点としてジャッキをつけポンツーンの位置を制御するところの、いわゆるドルフィン構造が必要となる。そうすると結局この点から水深とは無関係ではなくなってくる。構造物が空港の場合のように巨大化すると、ドルフィン構造の数も極めて多くなり、結局大水深のところでは経済的に成立し得なくなると考えられる。</p>
	緊張係留 <p>大水深(500 m~1000 m) 用として緊張係留方式がある。この方式は浮体、係留索、基礎(海底)から成り、浮体の4角に対応するように海底に基礎(パイル式または重力式)を4箇所設け、各々の間を係留索でつなぎ、浮体の浮力で係留索が常に引っ張られた状態(緊張状態)に保持される係留法である。 他の方式と比較し、大水深用として掘付期間、価格等の点で有利である。ただし万一の場合を想定しての話であるが、係留索が破断した場合には浮体の傾斜、転倒の危険性はまぬがれない。</p>
着底方式	固定構造 <p>海底に基礎パイルを打ちこみ、水中コンクリートで海底表面をしっかりと固め、その上の海中に脚柱を建てて海上の空間構造を支える方式をいう。この場合、水中工事に費用がかかるのはいうまでもない。特に水深が大きくなると、莫大な費用がかかる。費用の上昇度は水深が20,50,100,200メートルのところでおそらく飛躍的に大きくなる。</p>	<p style="text-align: center;">—略—</p>
	軟着底構造 <p>浮体構造と着底構造の両者の中間にあって、それぞれの長所を活かしたのがこの軟着底構造である。海底にポンツーンを横たえておき、その上に脚柱を建ててこれで海上のポンツーンを支える。すなわち、海上と海底のそれぞれにポンツーンがあるという、いわばポンツーンの2段階構造である。下部のポンツーンの内部はバラストタンクとなっており、バラストとして水を入れてある。この水量を増減することにより、構造物全体の重量と浮力をバラストさせて、海底にかかる圧力をできるだけ小さくすると同時に、構造物を安定させるべく浮力を調節する。このようにすると海底の基礎工事は不要である。ただしこの構造にも弱点がある。構造物の大きさが石油掘きく程度(例えばタテ・ヨコ各100メートル以内)の場合には問題がないが、空港のように広大な構造となると海底表面の凹凸の形状に構造物のフラットな下面が対応できなくなるからである。</p>
	ACT構造 <p>ACT とは能動的制御技術 (Active Control Technology) の略称で、従来の構造物設計の概念が外力に対して無抵抗に死に体のごとくかけられっぱなしであるという、すなわち外部荷重への対応が全く受動的 (Passive) であるのに対して、センサー、コンピューター、アクチュエーターの3機能を駆使して、積極的に過大荷重のような異常事態に対応して抵抗力を増大させるという、新しい概念に基づくものである。</p>

対する押えにしようと考えている。他には CCV 的機能をいかし図 5、6 に示すように予め周辺部の支柱タンクに注水し中心部のタンクは排水して、構造物全体に周高低中高ともいべき姿勢をとらせることも考えている。このようにすれば例えば人の場合なら風上に向かって頭

を低く下げ片足と腰を引いて身構えるのに相当する。

(2) 層状空間分離システムが作る多機能空間都市

都市の肥大化と超高層化が進んでいる。しかし肥大化は人びとを都市の中心から引きはなすことにより都市をますます住みにくいものとするし、あるいはまた人びと

図1 海洋情報都市の完成予想略図

図2 水中から眺めた海洋都市の基盤体の構造。
50メートルおきに支柱が立ち並ぶ

図 3 海洋都市のプロフィール。左端は比較のために付したエッフェル塔。

半浮遊構造と固定構造の接触部の詳細

図 4 半浮遊体と固定体のハイブリッド構造からなる基盤体（構造物）

が都心から離れまいとしてビルを超高層化すると縦方向の空間移動の味気なさに飽いてくるものだ。ではこのあとに来る発展とは一体どのようなものとなるのか。

高層化を人びとの嫌悪から解放するにはこれに比例してビルに横への広がりを与えるべきなのであろう。

私たちはこれの実証的論議をダンツィーグのコンパクト・シティの構想に見いだすことができる。彼は直径が数キロメートルの円形状で約20階建の巨大ビルといってもよい都市を考案した。交通機関としては円の中心を起点とした一種のモノレールのような懸垂電車を放射線状に走らせている。確かにこれは高層化すれば横の広がり

も欲しくなるという人間の願望を表していると考えてもよい。事実米国にはこれほど巨大ではないが横に平面的な広がりのあるビルが建てられているのを見たことがある。しかしこのような単純巨大化されたビル状都市ではいくつかの大きな問題点が見逃がされている。

例えば耐震構造がこのような屋上屋を重ねた巨大なコンクリートの塊に十分な経済性をもって設計し得るのかという問題。また部分的に朽朽化した箇所を建て直しリフォームする場合、果たして局部的に改造ができるのかという問題などである。この種の問題の大半を有効に解決するのが層状空間分離システムである。

ACT構造物のメカニズム

図5 台風による捲れ上がり現象と ACT 方式による対応策

俯瞰図

初期状態

姿勢制御状態
(自乗状態)

側面図

図6 ACT方式による構造物の姿勢制御状態

まず都市の機能を四つに大別しこれらを空間ごとに専用のに配置する。空間は鋼構造で四層のデッキで垂直方向に区切って作られている。最上層のデッキ上にはゴルフ場、野球場、ラグビーやサッカーのスタジアム、テニスコートなどのスポーツ設備や、科学技術の研究開発センターあるいはヘリポートないしは本格的な空港などを設ける。その直下の空間には居住区域、さらにその下にはビジネスセンター、そして最下層には都市を運営するための各種の設備、例えば上下水道、動力・空調工場、廃棄物処理、リサイクル、物資の集配送システムなどの各機能が設けられる。

各空間の高さ（デッキ間距離）を仮に20メートルとす

れば、これは五階建てのビルが優に建てられる高さである。ふつう地上に建てられたビルなら一端支持の片持梁の計算となるが、この場合の柱はデッキ間で両端支持梁となるから、構造材の寸法断面はうんと軽量なものですむ。従ってビルの改造工事に際してはその上下の階層に迷惑を与えることなく、必要な局部にのみ影響範囲をとどめることができる。

またそれぞれの機能空間に適応した環境作りが可能となるため、都市のアメニティ（魅力）をぐんと増やすことができる。上下方向の都市内交通は大型高速昇降機やエスカレーターを使って、極めて短時間内に異種空間間の移動ができる。水平方向の移動には新都市交通システ

ムや電気自動車が主体となる。特に後者はこの都市全体が一つの巨大なビルとしてエンクローズされ、都市ぐるみで地域全体が空調されているので、空気汚染を防止するためにもガソリン自動車の使用に替わるものとして重要な存在となる。

以上の層状空間分離システムは多機能空間とも呼ばれるが、移動の時間ロスがなく快適と利便を共有できるので近代的な生活をエンジョイするのに極めて有効である。例えば現在の大都市生活者がゴルフをしようと思えば一日がかりのものとなるが、このような多機能都市では往復の所要時間を含めて一時間半ないし二時間単位でハーフラウンドプレーを組み込むこともできる。すなわち複合多機能生活の設計が可能となる。

(3) アセンブリーの本質を満たす重厚長大の先端技術・アセンブリーとはコンストラクションの一分野を占めるもので、その本質は精度の上がったパーツ（形状部材）なりコンポーネント（機能部材）を組み立てることにあるが、この際、部品（パーツとコンポの総称）相互間の相対的な位置決めと接合（嵌合あるいは鋲接などによるもの）の二つの作業要素を一つの挙動で行うものを言う。このようにアセンブリーの本質とは位置決めと接合の同時化にあり、これを構造物建設に導入した古典例が日本の宮大工であることはラルッス大百科辞典のつとに指摘するところであるが、一方において先端技術の一般的なパターンの一つに部材の加工精度の緻密化があるところから、重厚長大産業の先端化においてもアセンブリーの工作的概念を導入することが不可欠と考えられだした。

従って海洋都市の基盤体構造ではすべて同型モジュールの繰り返しで構造物を製作できるように工夫している。またモジュールを現地（海上または海中）で最終的に大きく組み立てるのに水中では一切溶接を使わず、接合はすべて機械的接合により行うように配慮している。この場合部品は嵌め込みにより位置決めと接合を行うが、水中作業はすべてロボット化することを考えている。

先の同型モジュールはデッキ部と脚柱部（レグ、タンク、コラム）からなる。デッキ部は最近の超大橋に用いられているトラス構造等の利用による軽量化を目差すことはもちろんであるが、脚柱部は直径 15 m、深さ 100 m 程度の長大部材となり、その外皮の肉厚は耐バックリング性向上のための内部補強材の入れ方によって異なるが 40 mm 以上のものとなろう。

各部材の組立てに関しては、必要とされる相対精度問題からデッキと脚柱の接合あるいは隣近する脚柱同志のトランス材での結合は、精度を保持するに必要な箇所を

機械加工した後ハイテン・ボルト等による機械的接合となろうが、この他のデッキ部や脚柱部そのものの製作は溶接による組立てとなる。

デッキ部の溶接組立てはトラス構造等を利用し、可能な限り軽量化を図るため、用いる鋼板もさほど厚いものにならず、専用機やロボット等を利用した従来の自動溶接の延長の技術で対応が可能と考えられるが、脚柱部に関しては約 1 万本という数と肉厚（特に 80 mm 以上を必要とする場合）から膨大な溶接量が見込まれる上に、前述のごとく位置精度確保のために一部ではあるが、溶接組立後になされる機械加工を考慮した場合、効率が高く、変形の少ない溶接方法が必要となる。

これに應える方法として例えば EB 溶接の使用が考えられるが、この場合でも局所真空方式および全真空方式におけるドッキング式大型チャンバーや着脱式 EB ガン等の組合せによる効果的な溶接加工システムを考慮する必要がある。

4.2 海洋情報都市の規模と産業界へのインパクト

デッキは高さ 20 メートルごとの四層構造。下から上へ順次に都市の運営設備、住宅街、ビジネスセンター、空港ならびにスポーツ・レジャー設備の各機能を専有して多機能空間を形成、職・住・遊各空間相互の接近を図っている。縦・横各 5 キロメートルとすれば、デッキ層の面積は 25 平方キロメートル（四層で延べ百平方キロメートル）。単位モジュール 1 個あたり 1 万トン。縦・横各方向にそれぞれ百個配置して合計 1 万個、1 億トン。1 トン当たりの価格を低く見積って 30 万円（マस्पロ効果を考えれば単品生産時の価格 50 万円以上に相当）としても予算総額は 30 兆円となる。

INS など電子機器装備率を大体 3 分の 1 として 10 兆円程度を見込めば総額は 40 兆円。加えて都市の基本的内装費として同額の 10 兆円を計上しても優に日本の年間国家予算並みのものとなる。

ただし予算総額は技術的にいかにとも縮小できるのがこの構造システムの面白いところである。滑走路 1 本だけでなく幅 1 キロメートルとして 5 平方キロメートル、L 字型に 2 本とつても 9 平方キロメートル。ロの字型に中央部を吹き抜け構造にすれば完成状態で 16 平方キロメートルとさまざま。予算は基本的な都市構造で 1 平方キロメートル当たり 1 兆 2 千億円で計算すればよい。巨額の費用ではあってもインパクトは重厚長大から軽薄短小に至る全産業界に及ぶのである。

この都市の実現には多領域にわたる学問、業界が関係してくると思われるが、科学技術庁、運輸、建設、通産、郵政の各省をはじめとして多くの省庁も関係してくるであろう。

となると、学際性、業際性の二つに加えて省際性も大きな特徴の一つとなってくる。この三つの要素を通じて和がうまく保たれるならばプロジェクト推進の大きな力となるであろう。

5. 幕は今開かれようとしている。

GNP にしろ GDP にしろ日本はすでに世界のトップクラスに位しつつある。たとえ今後多少の経済的ダメージを受けたとしても、日本の将来の優位はまず動かないものとみてよい。このような豊かな日本が今後どのような道を選んで投資を重ねていくかは先進諸外国が興味をもって見守るところとなろう。成金が儲けた金をバラまくような印象を与えるようなことは、それが社会資本の充実へとつながるような場合にしても、厳に戒むべきことであろう。従ってできれば日本のとるべき道はあくまで科学技術の力を借りてこれを中心に進むというような形にしたいものだ。そしてその結果が人類の発展に資するとともに、さらに次世代の科学技術の開発に結びつくことになれば言うことはない。

以上の観点から海洋情報都市はバイオ技術やライフ・サイエンスから第5、第6各世代のコンピュータなどをも含めた次世代技術のインキュベーター（哺育器）として計画されているが、この他にも利用の道はいろいろな方向への発展につながっている。いま紙数の都合で詳述することはできないが、例えば前述のごとくレーガン米大統領が86年の年頭教書で述べた新オリエント急行(NOE)という名の極超音速旅客機(マッハ25)の東京側受け入れ

飛行場となることはもちろんのこと、現在防衛庁が計画中の横田飛行場の代替や、三宅島で嫌われた米艦載機発着練習用飛行場設置にも可能性は大きい。

また INS（高度情報通信システム）は海洋情報都市の重要なインフラストラクチャーの一つであるが、実はこれの実現に伴う諸問題を海洋都市は一挙に解決できる能力を持っているし、また多機能空間による複合的機能生活の設計と INS による健康診断システムの併用、さらには、将来この都市に設置が予定されるバイオメーション（バイオ・テクノロジー、ライフ・サイエンスとホーム・オートメーションの合成語、東大渥美和彦教授による）・センターの協力で不老長寿の町づくり計画（シャングリラ・プロジェクト）を樹立して、百歳青年を育てる案も考慮されつつある。

現在、日本の産業界の機能代謝の進展が本格化されようとしている。構造不況業種に代わって先端的重厚長大の育成による産業界の再編成は焦眉の急を要している。そして行き過ぎた食糧政策の是正とともに、30年間にわたる輸出振興の国家方針は漸く内需喚起・拡大に切り換えられようとしている。いずれも海洋情報都市の新たな出番につながるものである。研究開発体制については昭和62年12月10日科学技術庁主管のもとに財団法人海洋都市開発研究会（会長、山下勇）が発足し、政府所管の研究補助金の交付も決定している。次世代社会に向けて新しい産業界結成の機会が訪れているのだ。舞台の幕は今開かれようとしている。

展 望

各種環境割れの分類とその対策に関する最近の動向*

向 井 喜 彦**, 村 田 雅 人**

The Recent Trend of Classification of Environmental Cracking and Their Measures*

by Yoshihiko Mukai** and Masato Murata**

キーワード：応力腐食割れ，水素脆化，高温腐食，水素浸食，
バナジウムアタック，原子力，石炭液化

1. は じ め に

近年エネルギー問題が深刻化し，従来の石油にvari原子力や代替エネルギーとして石炭液化，ガス化等のプロジェクトが組まれ，また最近の著しい技術革新とあわせてそれら分野が急速に発展しつつある。一方，これら最新技術の実用化に際しては当然使用環境も苛酷化しており，耐環境性能の可否が最重要因子の一つとして浮上してきている。

そこで，このように複雑化する環境問題について各種最先端にある環境構造物で生じるあるいは生じ得ると推定できる環境劣化問題とその対策について各専門分野に携わっている研究者の方々にその展望ならびに防止に対する最先端技術を紹介して頂くことにした。内容としては現在ならびに将来重要視されている原子力プラント，石油プラント，各種化学プラント，更に石炭液化プラントの環境劣化問題をわかり易く展望，解説して頂く。なお，各プラントにおける環境劣化因子は，従来考えられている大多数の化学種を含み現象も多岐に渡り他の環境構造物への応用も可能であろうと思われる。

2. 代表的環境劣化現象とその分類

一般に，環境劣化としては腐食，脆化，割れなどその種類は多岐にわたっている。そこで，ここでは従来，特に重要視されている破局的破壊すなわち割れを誘導する環境割れ，高温腐食，水素浸食，バナジウムアタックなどの基礎概念を述べ今後の展望に対する予備的知識とする。

さて，環境による構造物の劣化を機構的に大別すると，材料と環境の界面において劣化が進行するもの [孔食，応力腐食割れ（腐食疲労を含む），バナジウムアタック，高温酸化（腐食）など]，材質そのものが劣化するもの [水素脆化，水素浸食，高温での脱炭を伴う材質劣化など] がある。表 1 はこれら環境劣化を引き起こすイオン種と材料の組合せを簡単にまとめたものである¹⁾。実機においてはそれらが複雑に組合さって割れを生じるものの，各プラントや環境構造物において必然的に環境イオン種と材料の組合せは限定され，その割れの状態も特徴的なものとなる。

まず，応力腐食割れは金属溶解により割れを生じる活性経路腐食型応力腐食割れ (APCSCC) と腐食反応によって生じた水素によって割れを生じる水素脆化型応力腐食割れ (HESCC) に大別できる。特に活性経路型応力腐

表1¹⁾ 各種環境劣化現象と材料・イオンの組合せ

	材 料	イオン種
APCSCC	γ 系二相系ステンレス鋼 Ni 合金， 炭素鋼， チタン合金 など	Cl^- , OH^- , DO NO_3^- , S^{2-}
HESCC	高張力鋼， チタン合金など	H^+ , S^{2-} , As, P
高温酸化	Cr-Mo 鋼， クロム鋼	H ₂ , CO など
バナジウムアタック	γ 系 (安定型) ステンレス Ni-Cr 合金	V_2O_5 Na_2SO_4
水素浸食	炭素鋼， Cr-Mo 鋼 ステンレス鋼	H (高温高圧)

*原稿受付 昭和62年 7 月10日

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka Univ.

食割れは Cl^- , NO_3^- , S^{2-} , OH^- , DO , $\text{CO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ などの存在により生じ, 主に表面での不動態皮膜の破壊にともなう金属溶解が原因と見なされ, ステンレス鋼では粒界のクロム欠乏層の形成やP, Sなどの粒界偏析により腐食反応は加速される。また, 炭素鋼, 低合金鋼では材料の硬さを高くすると割れ易くなり溶接熱影響部硬化域で問題となる。

一方, 水素脆化型応力腐食割れは高強度材で発生し, 例えば 130キロ級以上の高張力鋼では雨水や水蒸気でも割れを生じ, 構造物の軽量化, 高強度化を目標としている現在重要な問題となってきている。Ti 合金などにおいても水素脆化型応力腐食割れをおこすので海洋装置や航空機などで問題となる。また, 多量に水素を貯蔵し得る²⁾ので水素化物による脆化を生じる。

高温腐食問題としては酸化, 脱炭, 窒化, 硫化, 硝酸塩腐食, バナジウムアタックなどが重要である³⁾。酸化や脱炭は従来クリープ破壊で問題となり材質劣化を引きおこす。また, 硫化やバナジウムアタックは高温ガス環境で重要な問題となる。バナジウムアタックは重油などの燃焼ガス中に V_2O_5 を生じそれが金属表面に凝結, 結露し溶融層を形成することによって金属を加速的に酸化する現象である⁴⁾。これは, ボイラー過熱機関やタービンブレードで割れを起こす。次に, 水素浸食に関しては従来炭素鋼, 低合金鋼で発生しステンレス鋼は免疫とされてきたが, 石油化学工業で高温高压水素を取り扱う環境でステンレス鋼にも割れを生じる。その機構は高温高压水素ガス中において水素が鋼中に浸入し, 微少欠陥例えば粒界部に水素が集まり炭素と反応してメタン CH_4 を生じる。その内圧によりき裂が発生し同時に脱炭を伴う。それら構造物の設計においてはネルソン曲線(水素分圧 vs 温度)が用いられ⁵⁾, 当初は炭素鋼, Cr-Mo 鋼に拡張していたがさらに現在改定を頻度高く行い使用範囲を広げている。

以上はすべて従来より生じていた事例の支配的機構を示したものであるが実際には各種工業の発展とあいまって環境は複雑化し, 各代表例とは異った複合的劣化を生じる場合もあり得る。それらが環境問題をより複雑化し, 解決を困難なものにしているのである。

3. 各種プラントで新しく問題となる 環境劣化現象

詳細な議論は各担当者に委ねる事にしてここでは各種プラントにおいて問題となってきている環境劣化現象と時代的背景をまとめ問題提議とする。

まず, 原子力プラントにおいて沸騰水型軽水炉で一次

冷却系配管溶接熱影響部で粒界型応力腐食割れを生じ問題となった⁶⁾。しかし, 現在この点については材質を 304 から原子力グレード 304 L, 316 L に変更, また 347 L など安定型ステンレス鋼の適用を検討, 更に鋭敏化を最少限にいとめる為の溶接方法の実施(例えば水冷溶接など)やロボット導入による検査技術の向上などにより鎮静化している。また, 加圧水型軽水炉においても熱交換器のインコネルで孔食を生じていたが材質の改善やインヒビタの改良等により事例は少なくなっている。このように従来型原子炉の破壊事例は全体的には少なくなっているが, スリーマイル原子炉の冷却材喪失事故やチェルノブイリ原子炉など誤動作の重なりが重大事故を招いた例もあり単に技術的問題だけでは必ずしも解決できない問題点もうかがえる。

なお, 従来型原子炉においてなお問題となっているのは燃料被覆材であるジルカロイや熱交換器に使用される高 Ni 合金での割れや中性子による元素転換, 欠陥増加(He 生成等による放射線損傷)と靱性の低下などがあげられる。さて, 原子力の資源確保に目を転じるとウランの既資源は約 360 万トンで期待資源量は約 1400 ~ 1600 万トン, 日本で使用できるのはその内 10% 程度といわれている⁷⁾。図 1⁷⁾ は非共産世界天然ウラン累積必要量であるが, 従来炉をそのまま使用すれば西暦 2030 年にはウランは涸渇する。従って, 在来炉の燃

図1⁷⁾ 非共産世界天然ウラン累積必要量

料再処理をも考えながら2030年を目標に高速増殖炉(FBR)を実用化する必要がある。このように、原子炉の形態が軽水炉、転換炉、高速増殖炉と移行していく際、冷却材は液体ナトリウムが用いられ液体金属脆化や腐食など新しい環境劣化問題を生じ十分な対応が必要である。

次に、石油プラントにおいては従来の低深度石油資源の涸渇化に伴い高深度油井が開発されるが、図2^{8,9)}は石油掘さく深度の変遷を示したものである^{8,9)}。高深度油井では H_2S 、 CO_2 、 Cl^- を多量に含有し、抗口装置、ラインパイプに従来の低合金鋼に変わり高耐食ステンレス鋼が使用され始めている。しかし、当初有力視された2相ステンレス鋼は低濃度の H_2S 環境で硫化物応力腐食割れを生じる。更に腐食は勿論、耐水素脆化割れに対しても優れた抵抗性を有さねばならないことから最近さらに改良されたオーステナイト系にステンレス鋼の開発も進められている。また、化学プラントにも関連するが、石油化学工業では石油タンクなど炭素鋼に硫化物応力腐食割れを、水素化脱硫装置オーステナイト系ステンレス鋼にポリチオン酸による硫化物腐食割れを生じ従来より問題となっている。また、重油ガスを燃焼させるタービンブレードでは前述の如くバナジウムアタックが問題となる。

化学プラントとしてソーダ、繊維、肥料工業など苛性ソーダ溶液を取り扱う工業では炭素鋼のアルカリ割れを、また熱風炉や肥料プラントでは同じく炭素鋼で硝酸塩に

よる粒界型応力腐食割れを生ずる。図3¹⁰⁾に従来の化学装置損傷事例の集計の一例を示しておく¹⁰⁾。また、図4^{10,11)}は事故原因を調査したものであるが、設計の不備による事故は確かに多いがさらに現場技術者が環境劣化に対して認識をもっておれば防げる事故が多いことにも注意すべきである。則ち、環境劣化による事故を防止する上で現場技術者の教育は重大な因子の一つとなっている。その他、現在急速に進歩している各センサー技術、モニタリング、制御技術を採用し、有機的に組合せることにより事故を未然に防止することが可能になってきている。

さて、石炭液化、ガス化プラントは第一次石油ショックに端を発しその代替エネルギーとして各国で急激に開発

図2^{8,9)} 高深度油井深さの変遷

図3^{10,11)} 化学装置の損傷事例集計結果

図4¹⁰⁾ 米国の石油工業における事故の直接原因

展望

軽水型原子力発電所における腐食損傷とその対策*

石 原 只 雄**

Corrosion Failure and Its Prevention in Light Water Reactor Power Plants*

by Tadao Ishihara**

キーワード：軽水炉，沸騰水型原子炉，加圧水型原子炉，応力腐食割れ，蒸気発生器，減肉，デンティング，粒界損傷，腐食疲労，軽水炉長寿命化

1. はじめに

わが国で最初の商業用軽水型原子炉（敦賀1号炉）が運転を開始してから早くも17年近く経過しており，その間現在稼働中の軽水炉の多くが様々な腐食損傷を経験してきたが，それらの原因が究明され，諸対策が実機プラントにおいて効果的に実施された結果，腐食損傷事例も激減し，現在の高い稼働率を維持するまでに至った．原子力発電プラントの設備・機器または構造物の多くが30～40年の長期にわたる安全性及び健全性の維持を前提として設計されており，原子力プラントにおける安全設計の思想は，高い安全性，多重防護，供用中の監視システム等民間航空機のそれと極めて類似点が多いとされている。

軽水炉の一次冷却系統の機器構造に高度の安全性と健全性が要求されるのは，一次冷却材中の多量の放射性物質を原子炉系の外に漏らさないためである．また炉心近くにおいては水の放射線分解を生じたり，構造材料が高密度の中性子照射を受けるなど，他のプラントにない原子炉特有の環境下で使用される．本稿では，これまで国内外の軽水炉において経験された主な腐食損傷事例を中心に，それらの原因と対策ならびに今後の問題点などに関して述べる．

2. 軽水炉における主要構成材料

現用の軽水炉には，沸騰水型原子炉（BWR）と加圧水型原子炉（PWR）の2種類があり，BWRは図1に示すように炉心で発生した蒸気をタービン駆動系に供給

する直接サイクル方式であり，原則として二次系がないのに対し，PWRは図2に示すように蒸気発生器（SG）を介して一次系の水から熱交換によって蒸気を作り，タービンを駆動させる二次系から構成されている．

BWRの主要な接液部における構成材料を図中に示した．また表1には，PWRプラントの主要な接液部における構成材料を一次系及び二次系に分けて接液面積比で示した．

軽水炉環境における金属材料の腐食損傷は，冷却材としての高温高压の水及び水蒸気との接液部において生じているが，腐食損傷は，BWR一次冷却系のステンレス鋼配管，PWR蒸気発生器のニッケル合金製の伝熱管や炭素鋼給水配管，及び燃料被覆管材のジルコニウム合金などにおいて発生している．

3. 軽水炉における腐食損傷事例及び対策

ステンレス鋼やニッケル合金の応力腐食割れ（SCC）は，軽水炉が運転を開始して間もない1960年代の初めから経験されてきたが^{1,2)}，これらは特殊な事例として片付けられた．しかし，1974年以降に，米国や日本を始め世界各国のBWRにおいてステンレス鋼配管に多発した粒界型SCC（IGSCC）は，通常運転状態の水質条件において生じたことから，その重要性が広く認識されるようになった．一方，PWRにおいては，蒸気発生器伝熱管に使用されているニッケル合金製細管でSCCや減肉及びデンティング等が発生し，諸対策が実施されてきたが，現在でも一部のプラントにおいては，粒界損傷やSCCなどが起きている．以下，それぞれの腐食事例及びそれらの原因ならびに対策等について述べる．

3.1 BWR ステンレス鋼配管系における SCC

1974年9月の米国ドレスデン2号炉の再循環バイパス

*原稿受付 昭和62年7月8日

** 金属材料技術研究所 National Research
Institute for Metals

図1 BWR 型原子力発電所系統構成

図2 PWR 型原子力発電所系統構成

表1 PWR プラントにおける主要接液部材料 (110 万 KW 級)

	材 料	用 途	接 液 面 積 比
一 次 系	ニッケル合金	蒸気発生器伝熱管	70% 計100%
	ジルコニウム合金	燃料棒被覆管	25% (13,000 m ²)
	ステンレス鋼	機器・配管	5%
二 次 系	アルミニウム黄銅	復水器及び低圧ヒータの伝熱管	60% 計100%
	キューブロニッケル	高圧ヒータ、湿分分離加熱器の伝熱管	15% (210,000 m ²)
	炭素鋼	機器・配管	15%
	ステンレス鋼	湿分分離加熱器セパレータほか	10%

ラインのステンレス鋼配管の漏洩に端を発した SCC 事故は、その後世界各国の BWR においてバイパス管のはかに、ライザー管、炉心スプレー系配管、冷却材浄化系配管等において相次いで起こり³⁾、各原子力プラントとも点検、補修、改造などのため、運転停止にまで至り、SCC 問題は原子炉の安全性及び経済性に対して大きな

影響を与えてきた。

これらの SCC 問題に関しては、国の内外で多数の研究機関において活発な研究が行われた結果、原因も解明され、現在、わが国の BWR においては SCC 対策も終了し高い稼働率を維持している。しかし米国においては、最近でも一部未対策の配管部分で SCC 事例が報告

されている。

IGSCC 事例のほとんどが、304 ステンレス鋼配管の溶接熱影響部 (HAZ) において発生しており、発生要因としては、材料の鋭敏化、材料に荷重された高い残留応力 (ひずみ)、それと高溶存酸素濃度の腐食環境の 3 因子の重畳作用により生じたことが、国内外における調査及び研究の結果明らかとなった。当初は、4 インチ径 (100 mm) のバイパス配管に SCC が多発したが、その後米国などで 24 インチ (610 mm) および 28 インチ径 (710 mm) の再循環系の大径管にも発生した。図 3⁴⁾ には、再循環バイパス系の 4 インチ配管における SCC 発生箇所を示した。なお、大径管における SCC 発生に対しては、配管の溶接後の研磨によって生じた溶接ルートでの機械的なきず (すき間) が重要な役割を果た

しているとの報告⁵⁾もある。IGSCC の要因となった 3 因子に関して、これまで明らかにされた点ならびに SCC 対策等についてその概要を述べる。

(1) 材 料

304 ステンレス鋼を 773~1123 K (500~850℃) の温度範囲に加熱、またはこの温度域を徐冷すると粒界腐食感受性を有するようになり、いわゆる鋭敏化を生ずる。上記温度範囲においては、鋼中の炭素がクロムを主体とする炭化物 (Cr_{23}C_6) として粒界に析出し、粒界付近でのクロム量を 10% 程度にまで低下させる。このような粒界クロム欠乏層においては、溶存酸素濃度の高い高温水中で十分な耐食性が保持できずに、他の要因との複合作用により IGSCC を発生したものと考えられる。

実配管の溶接継手部の管内面が多層盛溶接熱影響部は、加熱及び冷却の繰返しにより著しく鋭敏化が進んでいること、またひずみサイクルによっても鋭敏化が加速されることが明らかにされている⁶⁾。

材料面からの鋭敏化防止対策としては、図 4⁷⁾ の SCC 防止対策例でも示したように、304 L や 316 L のような低炭素系ステンレス鋼や 347 のような炭化物安定化鋼の採用などがあるが、低炭素系にした場合には設計許容応力 (S_m) 値が低くなり設計上不利となるので、低炭素の材料に窒素を添加した原子力用 304 及び 316 鋼などが実用されている。なお、低炭素系の鋼種は、溶接のままの HAZ においても低温鋭敏化 (LTS) 現象に免疫であるとの報告⁸⁾もあるが、その後の研究において低温鋭敏化を受けることが明らかにされている⁹⁾。また、鋭敏化は内面肉盛溶接 (CRC) や固溶化処理によっても

図 3 BWR 再循環バイパス管における SCC 発生プラントと SCC 発生箇所

図 4 ステンレス鋼の SCC 発生要因及び防止対策 (内田の図⁷⁾に一部加筆)

防止でき、同時に残留応力も低減できる。

(2) 応 力

BWR 一次系のステンレス鋼配管にかかる外部応力は、ASME のボイラ・圧力容器コードセクションⅢ¹⁰⁾ の設計基準により許容応力が定められており、一次膜応力が Sm 以下に、また一次と二次応力との和が $3Sm$ 以下になるよう規定されている。オーステナイト系ステンレス鋼の 473 K (200°C) 以上の温度における Sm 値は、設計降伏強さ (Sy) の 90% に相当することから、 $3Sm$ は $2.7Sy$ であり見かけ上は降伏応力を越えた形になる。しかし二次応力の計算は、弾性変形を仮定した仮想応力であり、真の応力は 0.2% 耐力を越えることはない。ところが配管における溶接残留応力の測定例では、SCC 防止対策がとられる以前の配管には、溶接条件や管肉厚などによっても変化するが、0.2% 耐力以上の残留応力の測定値が得られている¹¹⁾。現在では、内面水冷溶接法 (HSW)¹²⁾、高周波加熱残留応力改善法 (IHSD)¹³⁾、バックレイ法 (BLW) 及び固溶化熱処理法などの各種の残留応力低減策がとられている。

(3) 環 境

BWR 環境下でのステンレス鋼の IGSCC 発生に対しては、水中の溶存酸素濃度の影響が極めて大きい。炉の停止時の大気開放下での室温における溶存酸素量は、8 ppm 程度であり、定常運転状態では、563 K (290°C) 付近の温度で、溶存酸素は 0.2 ppm 程度まで減少する。SCC 対策がとられるまでの運転法では、起動時において 423 K (150°C) 以上で溶存酸素が数 ppm の環境が存在し、IGSCC を助長した可能性も指摘されている¹⁴⁾。304 ステンレス鋼の 547 K (274°C) の高温水中における溶存酸素濃度変化による腐食電位測定からは、SCC が発生しなくなる限界電位は -400 mV (vs SHE) 付近にあり、そのためには溶存酸素濃度は 40 ppb 以下でなければならないとする報告¹⁵⁾もあるが、最近ではさらにこれよりも低電位側になるよう溶存酸素濃度をコントロールしないと割れる可能性があるとの指摘もある¹⁶⁾。上述のように IGSCC 発生が起動時の高い溶存酸素濃度に起因しているとの考えから、起動時における脱気運転法が提唱され¹⁷⁾、現在では国内 BWR プラントのすべてにおいてこの方法が採用されている。また、米国やスウェーデンなどでは、実炉を用いて水素注入による炉水の溶存酸素濃度の低減の試みを実施されており、この方法は BWR プラントの長寿命化とも関連して注目されている¹⁸⁾。

BWR 水質条件では、SCC にとって溶存酸素が重要な因子であることは既述の通りであるが、 O_2 以外では

H_2O_2 を含めて水の放射線分解生成物によるステンレス鋼の SCC への影響に関する検討も行われている¹⁹⁾。 γ 線照射等による環境の変化に着目した SCC 挙動への影響については種々検討されているが、照射後の材料による SCC への影響に関する報告は極めて限られており、数少ないデータからその影響度を評価することは現状では難しいため、今後この方面のデータの蓄積が望まれる。

一方、溶接熱影響部以外での SCC 事例としては、ナインマイルポイント 1 号炉において、316 ステンレス鋼再循環系配管の 308 ステンレス鋼溶接金属部において IDSCC (Interdendritic SCC) の事例が報告⁵⁾されている。その原因としては溶接金属中の炭素含有量が高かったことと、フェライト量が低かったことが挙げられている。したがって、対策としては、溶接棒のフェライト含有量を十分高くし (8% 以上)、炭素含有量を低く (0.03% 以下) する必要がある。このような溶接パラメータの適当なコントロールによって IDSCC 抵抗性が改善できるとしている。

3.2 PWR 蒸気発生器における腐食損傷

PWR においては、腐食損傷事例のほとんどが蒸気発生器 (SG) に集中していて、一次系配管や炉心部における腐食損傷事例は極めて少ない。図 5²⁰⁾ には、世界の PWR プラントの SG における 1984 年までの腐食損傷事例とそれらの発生割合を示す。初期の頃には減肉と二次側からの応力腐食割れ発生が顕著であったが、それらの原因が究明され対策が実施されてから年々減少の傾向を示し、それらに代って新たにデンティングや一次側からの SCC など、また最近では二次側からの粒界損傷 (IGA) 事例なども発生している。図 6²¹⁾ にはそれら

図5 世界の PWR 蒸気発生器伝熱管における損傷の経過
SCC(OD): 二次側 SCC 及び IGA,
SCC(ID): 一次側 SCC

図6 PWR 蒸気発生器における腐食損傷の発生部位

の腐食損傷の発生部位を示す。以下、それぞれの腐食事例について述べる。

(1) 応力腐食割れ

SG 伝熱管 (Alloy 600) における SCC の大部分が粒界割れであるが、一次側から発生したものと二次側から発生したものとに分けられる。伝熱管 (直径 22.2 mm, 厚さ 1.3 mm) の内面には原子炉一次側からの高温高压水 (約 583 K (310°C), 16 MPa) が、管の外側には二次水がそれぞれ循環している。一次系では水素を添加して水の放射線分解による酸素の発生を抑制しており、また核分裂反応速度を制御するためほう酸が添加されるので、pH の低下を防ぐ上から LiOH 添加により pH 調整を行うなどの水質管理が行われている。一次側からの割れは図6にも示したように直管部と U ベンド部の境界及び SG の中央部の曲げ径の小さい伝熱管の U ベンド頂部で発生しており、後者はデンティングに起因するものである。これらは、いずれも溶存酸素濃度のほとんどない高温純水中で発生しており、Coriou 割れ²²⁾とも呼ばれ、高応力や動的ひずみが原因となっている。これに対し、二次側からの割れは、管と管板とのすき間部や、管板または支持板部の近傍などで起こっており、二次側の水処理に用いられたりん酸塩から遊離したアルカリまたはスラッジの加水分解によって生じたアルカリがすき間内で濃縮したことによるアルカリ割れと考えられている²³⁾。

一次側から SCC 防止対策は、応力除去熱処理が、また二次側からの SCC 対策としては、揮発性薬品処理 (AVT) の採用や管板部の伝熱管の拡管によるすき間の排除などの諸対策が実施されている。しかし、この拡管の内側の部分での一次側からの SCC 事例も報告されている²⁴⁾。材料面からは、耐 SCC 性に優れた Alloy 690 などの採用も検討されている²⁵⁾。

(2) 減肉 (wastage, thinning)

減肉は図6に示すように、管板付近のスラッジの堆積部などで発生している。二次水の水処理に用いたりん酸塩の Na/PO_4 比が 2.8 以上になるとアルカリが遊離するため、アルカリによる SCC を起こす危険がある。そこでアルカリ SCC 防止の観点から、 Na/PO_4 比を 2.6~2.3 とし、 PO_4 濃度を 25~80 ppm とする Congruent 処理が行なわれるようになってから、SCC に代って減肉の問題が発生した。その原因としては、(i) Na/PO_4 比が 2 以下の場合にりん酸塩溶液から固相が析出して酸性となったため、ニッケルの溶解を促進²⁶⁾、(ii) ニッケルとりん酸塩との反応²⁷⁾、(iii) アルカリ腐食²⁸⁾、などによって生じたと考えられている。しかし、今日ではブローダウンの増加など運転方式の改善やりん酸塩を用いない AVT 処理への変換などにより、減肉は著しく減少した。

(3) デンティング (denting)

デンティングは、伝熱管と炭素鋼製の支持板との間に腐食生成物が詰り、伝熱管が変形する現象である²⁹⁾。また支持板にも大きなひずみが生じ、支持板中央部にある短冊状の通水口が砂時計形に変形することもある。このため通水口に近接する伝熱管の U ベンド部が変形し大きなひずみを生ずる。さらにデンティングによって生じた伝熱管の変形は、前述のように一次側からの SCC の原因になることもある。

当初、デンティングはりん酸塩処理から AVT 処理に切換えられた炉に起こったので、このような水処理の変更と関係があるのではとも考えられたが、その後最初から AVT 処理水で運転された炉でも起こることが分かり²¹⁾、別の理由によることが判明した。すなわちデンティングの原因としては、復水器からの漏洩によって混入した冷却水成分やスラッジの成分である塩化マグネシウム、りん酸ニッケル、塩化銅などが加水分解して、酸性塩化物を生じるためと考えられている。酸性塩化物溶液中において炭素鋼表面に生じる腐食生成物のマグネタイト (Fe_3O_4) は多孔質であるため体積膨張を生じ、すき間部での腐食生成物の成長に伴って伝熱管が圧迫されて変形するためデンティングを生ずる。国内ではデンティングは発生していないが、国内の PWR プラントにおいてはすべて復水器の後に脱塩装置が設置されていて、二次水が通過する際に、混入した冷却水成分を除去する方法が採用されていたためである。したがって、このような脱塩方法は諸外国でも広く採用されるようになった。また最近では支持板を炭素鋼から耐食性の優れた代替材 (405 ステンレス鋼) へ変更する案や伝熱管との接触部のデザイン変更なども検討され適用されている。

(4) 粒 界 損 傷

Alloy 600 製の SG 細管において、粒界損傷* (Intergranular Attack: IGA) 事例が国内外の PWR プラントで発生している。この IGA の事例は1977年頃から報告されており、図6に示すように SG の管板—細管及び支持板—細管の二次側のすき間部に発生しているが、同時に IGSCC も生じている。IGA の形態を詳細に調べると二つの形態に分類できる。一つは、粒界腐食がほぼ一定の深さで進行している場合であり、他は図7³⁰⁾に一例を示すように“finger”と呼ばれる局所的に深く腐食されている場合である。

IGA の発生要因としては、環境的には「アルカリ+酸化剤」であることがほぼ確かめられており、材料的には粒界での Cr 欠乏や P, S, B, Si, N 等の微量元素の偏析との関連の検討などが進められている。アルカリ性の環境の生成の原因としては、二次水において脱塩装置の後の補給水からの不純物の混入や復水器の漏洩等による塩水の流入などにより、上記すき間部において微量不純物が濃縮して高濃度のアルカリを生じたと考えられている。一方、これらの IGA を実験室試験により再現するため、国内外で種々の検討が行われているが、濃厚 NaOH 水溶液中での実験からも IGA は再現されている。しかし電気化学的検討からは IGA はカソード電位からアノード電位領域までの広い範囲において生ずるという報告³¹⁾もあり、水素脆性の可能性を示唆する見解も出されているが、アルカリに酸化剤を添加した環境においては、活性溶解から不動態の電位領域でのみ IGA を生ずることから^{32, 33)}、水素脆性によるとする考えは否定される。

図7 PWR 蒸気発生器伝熱管 (Alloy 600) に観察された粒界損傷。管板上面より7インチ (178 mm)下の二次側より発生した IGA/SCC。

*ここでは、IGC (粒界腐食)+IGSCC 型の腐食現象を指す。

また、材料側からの検討によれば、Alloy 600 の IGA は Mill Annealed 材において発生しやすく、TT (Thermally Treatment) 材には生じないことも実験室的には確認されている。したがって IGA 防止対策としては、(i)二次系の水質改善 (既設プラント)、(ii)材質改善及び(iii)伝熱管支持部形状の設計変更 (新設プラント) などによる諸対策が実施されている。水質の改善法としては、(a)復水脱塩装置の設置による不純物の除去、また (b) 二次系水へのホウ酸の添加によるアルカリの中和あるいは (c) 高ヒドラジン添加による IGA 発生防止などの対策がとられている。材質面からは、耐 SCC 性の高い Alloy 690 の TT 処理材^{29, 32, 34)}の使用が新設プラントでは検討されている。なお IGA を生じた SG においては、IGA 発生箇所の細管の内部にスリーブを挿入して補修する方法などの対策がとられている。

3.3 燃料被覆管における腐食損傷

燃料被覆管材として軽水炉において広く用いられているジルカロイ—2及びジルカロイ—4の高温の水または水蒸気中における腐食速度は、最初は時間の3乗則に比例するが、腐食量が約 30 mg/dm^2 (皮膜厚さに換算して約 $2 \mu\text{m}$) 以上になると直線的に腐食が急増して³⁵⁾、実用上の問題点の一つである皮膜の剥離 (break away) を生じる。これはノジュラー腐食と呼ばれ、そのメカニズムとしては、(i)酸化皮膜中に分散している金属間化合物による局部電池の生成説³⁶⁾や(ii)酸素イオンの酸化皮膜中への拡散による皮膜界面での Zr の酸化及び水素ガス圧によって生ずる皮膜破壊説³⁷⁾などがあるが、現在のところ定説はない。

ノジュラー腐食の防止法としては、ジルカロイの熱処理 (焼入れ、焼戻し) による組織制御やジルカロイ表面に Ni-Cr や Pt などのスパッタリングによる表面改質の方法などがある³⁸⁾。

また燃料被覆管の腐食損傷に関連しては、燃料棒の通常運転時における PCI (ペレット—被覆管相互作用) 破損の問題がある。長期間低出力で燃焼させた燃料棒の出力を急激に上昇させた場合に、燃料棒の破損を生じた例が、1970年代に入ってから国外の BWR 及び PWR で発見されてから³⁹⁻⁴¹⁾、この問題の重要性が認識されるようになった。破損の外観上の特徴としては、燃料被覆管に大きな変形もなしに軸方向に割れが入っていることである。破損の原因としては、ペレットの熱膨張によって生ずる被覆管内の周方向の引張応力と腐食性核分裂生成物 (FP) のヨウ素との共同作用のもとで、被覆管の内面から SCC が発生し管肉厚を貫通して破損に至ったものと推定されている。

近年, PCI 破損に関する研究のため試験炉を用いた出力急昇試験が国内外で行われ⁴²⁾, その成果は PCI 破損対策に反映されている。したがって, 今日では軽水炉燃料被覆管の PCI/SCC 破損は著しく減少している。PCI/SCC 対策としては被覆管内面へのグラファイトコーティング, Cu バリヤ及び Zr ライナーの設置などにより PCI 時の応力緩和や摩擦力の低下とジルコニウムとヨウ素の接触防止などが採用されている。

3.4 その他軽水炉配管及び機器等における腐食損傷

軽水炉配管の基本材料である炭素鋼は, 通常の運転状態においては, 全面腐食量も比較的少なくあまり問題にされないが, 溶存酸素濃度が低く, かつ高流速の場合には全面腐食も生じやすくなる。この原因としては, 保護性のないヘマタイト (Fe_2O_3) 酸化皮膜の剥離などによって生ずる減肉によると考えられている。また過剰の溶存酸素下では孔食の発生などの問題があり, 適当な溶存酸素量にコントロールすることが防食上重要である。炭素鋼及び低合金鋼の高温高压純水中での繰返し負荷や SSRT 法による実験室試験の結果では, SCC 感受性を有することが分かったが⁴³⁻⁴⁵⁾, 実機配管においては SCC はまったく生じていない。しかし, 高温純水以外の環境においては, 例えば PWR 二次系の低圧蒸気タービン系の低合金製のタービンディスク等においてかせいアルカリに起因すると考えられる SCC 事例が報告されている⁴⁶⁾。

腐食疲労は, PWR 二次系の炭素鋼給水系配管においても発生しており, 米国の PWR プラントの蒸気発生器二次側の給水系配管について 1979 年に行われた調査の結果, 検査を実施した 26 基のプラントのうち, 15 基に割れが発見された⁴⁷⁾。割れは, いずれも蒸気発生器ノズルへつながる主給水系配管のエルボ部分で生じていた。ほとんどの割れが溶接熱影響部において周方向に生じていた。これらの割れは, 応力集中部に限られており, また破面解析からもストライエーションが観察されたことから, 平均応力に時折, 熱応力が重畳されて生じた腐食疲労によるものであらうと判断され溶接や応力面からの対策がとられた。

一方, 原子炉圧力容器の内面には, 耐食性確保の上からステンレス鋼の溶接肉盛りが施されているが, ステンレス鋼肉盛り部分においてクラックが発生し母材の低合金鋼にまで達する事例^{1, 48)}が報告されている。そこで, このような欠陥が母材の低合金鋼に対して腐食疲労によるき裂進展の起点となることが予想されることから, ASME コードセクション IX では, 高温水中における腐食疲労の評価が供用中検査として規定されている。1978

年から米国の NRC 及び EPRI の呼びかけによって ICCGR 委員会が設立され, 原子炉一次耐圧部構造材の高温水中における腐食疲労に関する ASME コードの見直しが国際的規模の共同実験により実施されている。さらに, 軽水炉の長寿命化に関連して, 米国などでは圧力容器鋼の照射後の腐食疲労特性に関する検討も行われている。

4. 今後の課題

最近, 軽水炉技術の高度化に伴い, 運転中の長期にわたる安全性・健全性の維持とともに, 経済性の向上が強く要請されており, 軽水炉の運転経験がわが国よりも約 10 年も先行している米国においては, 既設プラントの長寿命化を計るべく種々の調査研究が行われている。またわが国の軽水炉高度化計画においても, 原子力発電所の長寿命化技術を開発し, 生涯発電量を増大させることの有用性が指摘されている。軽水炉の安全性を損うことなく設計寿命を延伸するには, 余寿命予測を精度良く行うための技術と方法及び寿命延伸のできない機器などにおいては取替え・改修等の技術と方法などが確立されねばならない。したがって, 長寿命化技術開発においては, 軽水炉構造部材の損傷劣化の程度を定量的に把握し, 余寿命を的確に評価する技術を確立しておくことが最重要課題である。腐食損傷による材料劣化のモニタリング技術の開発に関連しては, とくにその定量的評価が難しいとされる SCC, IGA, 減肉その他の局部腐食の欠陥検出技術の開発及びそれらの定量的評価法の確立など今後推進すべき重要な研究課題と考えられる。

現在国内外において軽水炉の主要な構造部材に関する腐食損傷をも含めた材料の経年劣化に関するデータの調査・検討が進められているが, これらのデータベースの構築と並行して実機プラントにおける炉水化学のデータを正確に把握しておくことは, 水質管理のみでなく寿命予測に関しても十分に活用できる。例えば, これまで技術的にも困難なため開発が遅れていた, 高温高压の炉水中における pH, 電導度, 溶出金属イオンなどのモニタリング法が開発されれば, 腐食損傷の予測に対しても有効な手段となりうるであらう。これらの新しい測定技術の開発は, 原子力以外の他の分野への波及効果も大きいと考えられる。さらに, 現用材料のみでなく将来材料も含めた構造材料の高温水及び高温水蒸気中における各種形態の腐食損傷の基準データを取得し, これらのデータベースを基に知的データベースとともにエキスパートシステムにまで拡張することにより, 環境中材料損傷劣化の診断システムの確立も可能とならう。

一方、軽水炉における長寿命化とも関連して将来長サイクル運転や高燃焼度化の要請が高まることが予想されることから、高燃焼度化に伴うジルカロイ被覆管のノジュラー腐食のメカニズム等については十分に解明しておく必要がある。また、長期間運転後の一次系配管・機器等に蓄積した放射性腐食生成物の化学除染の実施は、定期点検時における作業従事者の被曝低減対策とも関連して重要であり、除染液による腐食損傷への影響などに関しては現在も国内外で調査及び研究が進められているが、プラントの長期にわたる健全性の確保の上からも引き続き詳細に検討すべき課題である。

参 考 文 献

- 1) S. H. Bush, R. L. Dillon: Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of iron base alloys, NACE-5, Eds. R. W. Staehle, et al., NACE (1977) 61.
- 2) C. F. Cheng: J. Nucl. Mater., 56 (1975) 11.
- 3) EPRI, Chicago meeting, Mar., (1975) 4.
- 4) EPRI, "Compilation of information from BWR pipe crack meeting", Chicago, May, (1975).
- 5) J. F. Copeland and A. J. Giannuzzi: "Long-term integrity of nuclear power plant components", EPRI NP-3673-LD, Project 2057-4, Final report, Oct., (1984).
- 6) 日本溶接協会：原子炉配管系における局部的構造挙動と安全性評価に関する試験・研究（その3），JWES AE-7807 (1978).
- 7) 内田：原子力工業，33, No.4 (1987) 15.
- 8) 明石：防食技術，29 (1980) 142.
- 9) 向井，村田，坂井：溶接学会全国大会講演概要，第40集 (1987) 176.
- 10) ASME boiler and pressure vessel code, section III, (1977).
- 11) 象，他：溶接学会講演概要，第20集，62 (1977).
- 12) 三木，他：日立評論，60 (1978) 13.
- 13) 梅本，田中：石川島播磨技報，18 (1978) 29.
- 14) F. P. Ford, M. J. Povich: Corrosion, 35 (1979) 569.
- 15) J. C. Danco and M. E. Indig: Predictive method for assessing corrosion damage to BWR piping and PWR steam generators, NACE, (1982) 112.
- 16) M. E. Indig and J. E. Weber: Corrosion, 41 (1985) 170.
- 17) M. E. Indig: Paper presented to seminar on countermeasures for BWR pipe cracking, Palo Alto, USA, Jan., (1980).
- 18) I. Spiewak, R. S. Livingston and C. A. Negin: EPRI NP 4208 (1985).
- 19) 菊池，大中，湊：防食技術，33 (1984) 33.
- 20) O. S. Tatone, P. Meindal and G. F. Taylor: Steam generator tube performance, Experience with water-cooled nuclear power reactors during 1983 and 1984, AECL-9107 (1986).
- 21) S. J. Green and J. P. N. Paine: Nucl. Tech., 55 (1981) 10.
- 22) H. Coriou, et al., : Corrosion, 22 (1966) 280.
- 23) J. R. Weeks: Nucl. Tech., 28 (1976) 348.
- 24) E. M. Blale: Nucl. News, Dec., (1982) 49.
- 25) A. J. Sedricks, et al., : 防食技術，28 (1979) 82.
- 26) W. D. Fletcher and D. D. Malinowski: Nucl. Tech., 28 (1976) 356.
- 27) J. R. Weeks: "Corrosion problems in energy conversion and generation, The Electrochem. Soc. Inc., (1974) 322.
- 28) A. J. Panson, et al., : J. Electrochem. Soc., 122 (1975) 915.
- 29) P. J. Pettit and P. F. Mctique: Mater. Perform., 17 (1978) 36.
- 30) G. P. Airey and F. W. Pement: Corrosion, 39 (1983) 46.
- 31) R. Bandy, R. Roberge and D. Van Rooyen: Corrosion '84, April, 1984, Paper No.179.
- 32) B. P. Mirglin and L. W. Sarver: Corrosion '85, Mar., 1985, Paper No.89.
- 33) H. Nagano, K. Tokimasa, K. Yamanaka and H. Miyuki: "Effect of environmental and material factors on the intergranular attack of alloy 600, EPRI workshop on remedial actions for secondary side intergranular corrosion, Oct., 1985.
- 34) P. M. Scott: Corros. Sci., 25 (1985) 583.
- 35) Zirconium data manual, UKAEA, TRG Report, (1962) 108 R.
- 36) A. W. Urquhart: J. Electrochem. Soc., 125 (1978) 199.
- 37) R. Kuwae: J. Nucl. Mater., 119 (1983) 229.
- 38) N. Ramasubramanian: J. Nucl. Mater., 119 (1983) 208.
- 39) K. Gazzaroli, et al., : KWU observations and hypothesis of PCI failure, IAEA specialists, June-July, Vienna, (1977).
- 40) Juncrans and O. Varnild: ASEA-ATOM research on PCI, ANS topical meeting, St. Charles, May, (1977).
- 41) W. J. Penn, et al., : Nucl. Tech., 34 (1977) 249.
- 42) 市川：原子力工業，24, No.9 (1976) 17.
- 43) 石原，大橋：腐食防食 '86 講演予稿集 A-306, (1986) 105.
- 44) 福田，明石：第33回腐食防食討論会予稿集 A-110, (1986) 43.
- 45) 国谷，菅野，正岡，佐々木：防食技術，32 (1983) 649.
- 46) D. Kalderon: Proc. Inst. Mech. Engrs., 186 (1972) 379.
- 47) B. Vyas, et al., : Nucl. Tech., 55 (1981) 525.
- 48) 近藤：日本材料強度学会誌，14, (1977) 141.