

プロセス機器

Process Equipment



GTLリアクター・ブロック南ア陸送



2.25Cr-1Mo-V鋼製リアクター



貯蔵キャスク

辻 輝 夫 Teruo Tsuji ①
 岩 男 義 明 Yoshiaki Iwao ②

1. はじめに

本稿はプロセス機器および原子力機器の歩みと展望について述べたものである。2章ではプロセス機器について述べる。プロセス機器といっても、蒸留塔、精留塔、吸収塔、吸着塔、分離器、貯槽、合成塔、改質器、反応器、熱交換器、加熱炉、攪拌槽、その他石油精製装置、石油化学装置、化学装置に用いられる種々のものがある。今日、当社で製作されるプロセス機器は、さまざまな変遷をへて、塔槽類および反応器などの圧力容器と、熱交換器に集約されるに至った。ここではこれらの機種に焦点を絞る。

3章では、当社における原子力事業の沿革、特に主力製品であるキャスク事業の現在にいたる発展の歴史、ならびにキャスク以外の事業の概要について述べる。

2. プロセス機器

2.1 プロセス機器の開化期

造船会社は、元来、船殻の建造能力と共に、機関や機器の造機を製造する能力を有した。造機ではボイラや蒸気槽、ディーゼル機関の空気槽などの製作、およびボイラの管加工も行っていたので、今日の圧力容器や熱交換器などの製缶技術の源流となる技術を有していたと考えられる。日立造船100年史には

- (1) 明治29年にろ過器や粉碎器を台湾の設備用に製作。

- (2) 大正13年に鋳打ち攪拌槽（図1）、同14年には摂津製油所向け鋼製溶接タンクを製作。
 (3) 第一次大戦後から昭和初期の化学工業興隆期に吸収塔、油槽、ガス槽、製品貯槽、運搬容器をはじめ、攪拌槽、ろ過器、遠心分離器、蒸留装置、その他種々のプロセス機器を製作（図1）。

などの記事が紹介されている。

掲載された写真からは、興隆する化学工業をハード面から支えようとする先輩たちの意気込みがうかがえる。

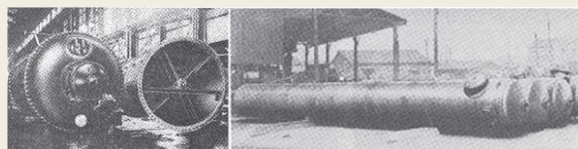


図1 大正13年製攪拌槽と
昭和2年製アンモニア気化槽

2.2 高度経済成長期

2.2.1 時代的背景

第二次大戦からの復興を経て日本経済が高度成長期に突入すると、造船各社は、昭和34年ごろに産業機械分野へ積極的に進出した。昭和34年には日本の新造船部門と陸上部門の売り上げがほぼ同額であったが、38年には陸上部門の売り上げが新造船部門の2.4倍に拡大した。造船各社は、製缶能力を発揮して、石油精製および石油化学装置用のプロセス機器を各地の臨海工業地帯に建設される石油コンビナートに納入し、「高度経済成長」の一翼を担った。

日立造船においても同時期、因島工場から多くの人材が桜島地区に集められて、陸上部門の拡大が図られた。

プラント部門では、紙・パルププラント、化学プラ

① Hitz日立造船㈱ 機械・インフラ本部 イリノイ州RPE 技術士(機械)

② Hitz日立造船㈱ 機械・インフラ本部

ント、合成化学、石油プラントなどのエンジニアリング事業を展開するために、プラント計画部（プロセス計画）、装置設計部（機器の配置と配管計画）、機器設計部（容器、熱交、炉、貯槽、攪拌槽などの設計）が編成された。

桜島工場、因島工場、神奈川工場、合併後の舞鶴工場でも、当社プラント部門が建設した昭和電工向け530T/Dアンモニアプラントや、四日市、堺、千葉、鹿島、水島などの石油コンビナートに向けて、多数のプロセス機器を製作した。そして産業界のニーズに応じて自社技術の開発と、先進技術の導入に努めた。

2.2.2 長大塔類の製作 今日ではプラントのユーザーと機器のメーカーの間に、エンジニアリング会社が介在するという形態は、世界中に普及した。しかし当時の日本では、装置のユーザーとメーカーの技術者が、プロセス、材料、工法について議論を重ねながら仕様の細部を詰めていくこともしばしば見られた。

当社でもこのような先輩技術者たちの努力によって常圧蒸留塔、減圧蒸留塔、精留塔、その他長大塔類を多数受注し、石油コンビナートに納入した。その例として

- (1) 富士興産海南製油所向け減圧蒸留塔（因島のドックで最終組み立て）
- (2) 昭和電工川崎工場CO₂放散充填塔（高さ50mで完成当時、東洋一）
- (3) 大阪エチレンセンター向けメタン塔・エタン塔（全長79mで、当時、世界一）
- (4) 日産化学富山工場向け硝酸精留塔、反応器（主要機器すべて）
- (5) 三井東圧堺向け流動反応器
- (6) チッソ水俣の球形タンクおよび千葉の球形タンク

2.2.3 技術計算の電算化 昭和40年までの設計計算は、計算尺やタイガー手回し計算機を用いて行われ、長大な塔類の強度設計では、地震荷重および風荷重に対するモーメント計算に長時間を費やした。日立造船は昭和30年代末に日立製作所製大型電算機HITACを導入し、全社あげて電算化を進めた。プロセス機器部門も塔類の設計計算や、熱交換器の管配列計算、攪拌装置の軸計算の電算化に取り組んだ。FORTRAN言語を使ってプログラムを組む人口が飛躍的に増えた。

2.2.4 蒸留塔の性能計算 プロセス機器部門では、蒸留技術に関するポテンシャルを高めて、蒸留塔の塔径、塔長、トレイの段数を決める技術の構築に努めた。主な活動として

- (1) 若手技術者の国内留学（東京工大、都立大など）
- (2) シーブトレイの性能実験
- (3) 米国グリッチ社のトレイ供給に関する合意
- (4) FRI（米国蒸留組合）へ加入
- (5) 性能計算の電算プログラム開発

当社がシーブトレイの設計・製作から蒸留塔の製作

まで全てを担当したり、グリッチ社からトレイを購入して性能確認の上、蒸留塔と共に納入するまでに実力が高められた。

2.2.5 多層容器に進出 当社建設のインドグジャラット州アンモニアプラントでは、心臓部のアンモニア合成塔を、他社の多層容器に委ねたが、アンモニア合成塔を自社で製作するために、昭和45年米国ストラザーズ社と「焼きばめ式多層容器」に関する技術提携を結んだ。

3層の多層円筒モデルを用いた焼きばめ応力の実験、大型模型容器を用いた破壊実験などを実施した。当時、桜島工場の曲げ能力は最大厚さ70mm程度であったため、焼きばめ式多層高圧容器への期待が高まった。

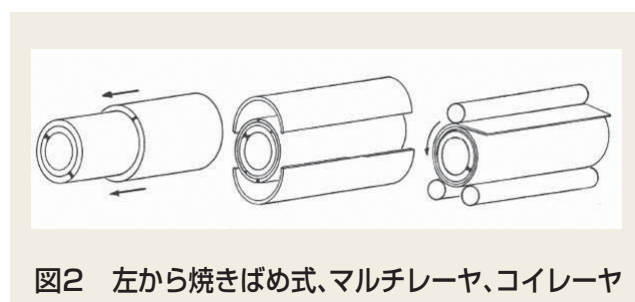


図2 左から焼きばめ式、マルチレーヤ、コイレヤ

やがてA.O.スミス社の技術による神戸製鋼のマルチレーヤ、三菱重工開発のコイレヤ、そして日立造船が導入したストラザーズ社の焼きばめ式多層容器などがASMEの規定に組み入れられた（図2）。

多層容器の製作実績は表1に示すとおりであるが、その後、曲げ能力が飛躍的に増大したため、曲げ能力不足から多層容器を用いるというよりも、尿素反応器や尿素用熱交換器のように、溶接後熱処理を省略してライニング材の耐食性劣化を回避するというプロセス上の要求から多層容器が選択されるようになった

表1 多層容器の製作実績

機器名	納入基数
アンモニア合成塔	9基（桜島3、有明6）
尿素反応器	11基（桜島0、有明11）
尿素用熱交換器	12基（舞鶴6、有明6）
その他高圧容器	39基（桜島25、有明14）
合計	71基（桜島28、有明37、舞鶴6）

2.2.6 高温高圧委員会 当社は関西石油、大協石油、丸善石油向けにAMOCOプロセスの直接重油脱硫装置の売込みを図ったが、行政の方針で実現しなかった。脱硫反応器に関する見積評価の結果、当社と米国CBIや国内の先発同業他社との格差を認識することになった。

これが契機となって、脱硫反応器製作の自社技術を確立しようと、昭和47年「高温高圧委員会」が設立され、「応力解析」、「動的解析」、「材料・製作」のワーキンググループのもとに、次の研究・開発が実施された。

- (1) 応力解析、耐震解析有限要素法プログラムの開発
- (2) 2.25Cr-1Mo鋼鍛造品の熱処理特性
- (3) 2.25Cr-1Mo鋼のエレクトロ・スラグ溶接
- (4) 極厚2.25Cr-1Mo鋼の焼き入れおよび低温割れ
- (5) 容器内面のステンレス鋼肉盛溶接
- (6) マルチ・タンデム超音波探傷試験、ほか

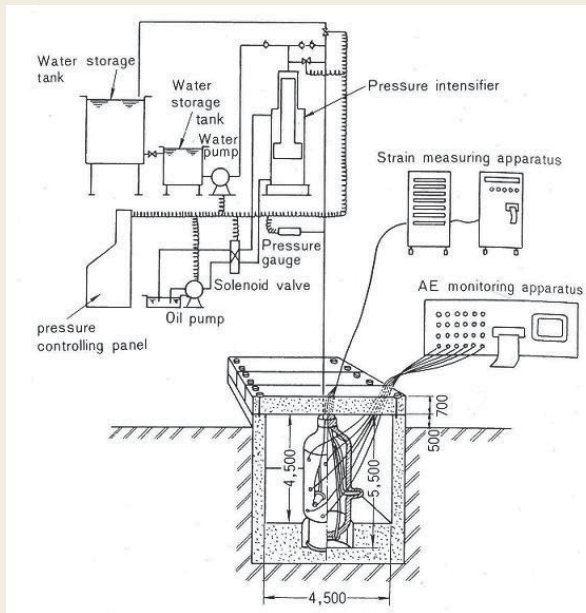


図3 大型模型実験装置の概念図

集大成として実機大の模型容器を設計・製作し、鉄筋コンクリート製ピットの中で水圧試験および疲労試験を行って、応力測定、人工亀裂伝播試験、アコースティック・エミッション（AE）試験などを実施した（図3）。研究成果は、昭和50年12月・第36巻・第4号の日立造船技報「高温高压容器特集号」に14編の技術論文として報告され、模型実験の結果は昭和51年、東京で開催の「圧力容器技術国際会議」で発表された。

2.2.7 米国CBIとの技術提携 日立造船は、昭和47年頃、米国CBIと船用LNG球形タンクの共同開発を進める一方で、タンク建設で全米1位のCBIと共に、アジア地区のタンク建設を行うHZ-CBIを設立した。

さらに昭和49年、高温高压容器の分野でも高い評価を得ていたCBIと、高温高压容器の設計、製作に関する技術提携を締結した。CBIから習得した主要技術は

- (1) 応力解析技術と解析プログラム
- (2) 設計報告書の作成要領
- (3) エレクトロ・スラグ溶接
- (4) 6電極オープン・アーク肉盛溶接の技術
- (5) 厚肉鋼板の曲げ成形技術、その他製作技術

CBIでの研修を通じて、ASME U2スタンプ容器の設計認証を行うイリノイ州登録RPEが1名誕生した。

2.2.8 ASMEコード・スタンプ プロセス機器の主な国内プロジェクトはすでに終焉を迎えてい

たため、営業活動は海外に活路を見出すことになった。ところが海外顧客に受け入れられるためには、ASMEのU、U2スタンプを取得することが不可欠であり、桜島工場がASME審査を受検して昭和48年にスタンプを取得し、舞鶴、因島、神奈川工場も続いた。平成22年現在でU2スタンプ適用容器の製作実績は、360基を超える。（図9）

2.3 有明新陸機工場の建設

2.3.1 新陸機工場建設の背景

昭和48年の第一次石油ショックによって、造船業界は造船不況に陥った。そこで昭和52年、新造船専用の有明工場にプロセス機器を製作する有明新陸機工場の建設が決定された。



図4 建設当初の新陸機工場全景

新陸機工場は米国のバブコック・ウイルコック社、コンバッション・エンジニアリング社、CBI社、ならびに国内大手などを参考に計画され、最新鋭で最大級の高温高压容器工場として昭和54年に操業を開始した（図4）。

2.3.2 設備能力 新工場は、直径20m、長さ100m、重量1000トンまでのプロセス機器が製作できるように計画された。建設時の主要な設備能力を表2に示す。

表2 有明新陸機工場の当初の設備能力

設備	能力
曲げ設備	10000 トンプレス（冷間最大厚さ 300mm） 5500 トン立型ベンダー（最大厚さ 100mm）
放射線試験	12MeV ライナック 0.95MeV ライナック
熱処理炉	大型炉（11m x 31m x 1000 トン@950°C） 中型炉（6m x 21m x 200 トン@950°C） 加熱炉（6m x 10m x 100 トン@1250°C）
揚重設備	500 トン～100 トン天井クレーン
場内運搬	自走台車（最大積載荷重 750 トン）
出荷能力	ガントリークレーン（最大吊り上げ荷重 700 トン）

2.3.3 要員確保 新陸機工場には、有明工場造船部門、桜島、因島、神奈川工場の化工機部門か

ら設計、製造スタッフ、作業員が約350名集められた。製作課題の検討と、出身工場による溝を埋めるために、阿蘇研修センターで「週末泊まり込み研修」が盛んに行われた。

2.3.4 プロセス機器の販売促進活動

- (1) 商社依存から脱却し、自主営業を展開するために、昭和52年春、欧州4カ国のエンジニアリング会社を歴訪して、尿素反応器ならびに熱交換器の技術説明を行い、同年夏、米国のエンジニアリング会社20数ヶ所を歴訪して、高温高压容器と高压熱交換器の技術説明を行った。欧米の当社駐在事務所にもプロセス機器出身者を配置して、顧客と直接商談を行うようになった。
- (2) 有明新陸機工場に対する需要を掘り起こすために、昭和53年、設計、研究所、工場からの選抜メンバー4チームを編成して、北米、アジア・オセアニア、中東、ならびにヨーロッパの有望顧客を訪問し、新工場および高温高压容器技術の紹介を行った。

2.3.5 カンパニー・プロジェクトCP6 昭

和55年ごろ日立造船は、新製品・新事業育成のために、全社規模でカンパニー・プロジェクト制度を発足させた。高温高压容器もCP6として選ばれ、研究・開発が行われた。

(1) **狭開先MIG溶接** 大入熱で全厚さ同時溶接のエレクトロ・スラグ溶接に代わる溶接法として、狭開先MIG溶接を開発し、エレクトロ・スラグ溶接後の焼き入れ・焼き戻し熱処理を省略する道を開いた。

(2) **ステンレス肉盛溶接** 6電極オープン・アーク・ステンレス肉盛溶接に代えて低希釈率シャロー・ペネトレーション肉盛溶接を導入し、さらに磁場利用のエレクトロ・スラグ肉盛溶接 (ESW) を採用して50～150mm幅で平滑な肉盛面を確保した。その後3電極連続ESWを開発して、高品質・高能率の肉盛溶接に進化させた。

(3) **多層容器の適用拡大** 多層容器の適用範囲を極厚鍛造容器の厚さまで拡大するために、1層62.5mm厚さを5層、および38mm厚さ7層と30mm厚さ2層を焼きばめた多層円筒を2個製作して周溶接を行い、伝熱特性や非破壊検査適用法の実験を行った。成果はサンフランシスコの「圧力容器技術国際会議」で発表した。

(4) **RPEの増員と技術提携の終結** CP6関連で2名の技術者が、CBIで研修を受けながらRPEの資格を取得した。しかし提携のテリトリー条項で、日立造船はCBIのある北米への参入が認められず、高温高压容器の受注ができないため、昭和58年、技術提携を終結した。

2.3.6 超大型容器に対する新工法

海外案件の国際競争の激化、およびCBIとのテリトリー問題から、一時、厚肉容器よりも新工場の強みが活かされる超大型容器に活路を求めて (図5)、次のような開発を行った。

- (1) 超大型の減圧蒸留塔パネルを屋内で製作し、屋外で組み立ててブロック化する「パネル工法」。
- (2) ブロックをドック内で積み上げて完成し、立て向きに水圧試験を行う「ブロック積層工法」。
- (3) パネルの垂直1パス溶接用にエレクトロ・ガス・アーク溶接、および積層ブロックの水平周溶接用にパルス・ミグ自動溶接。

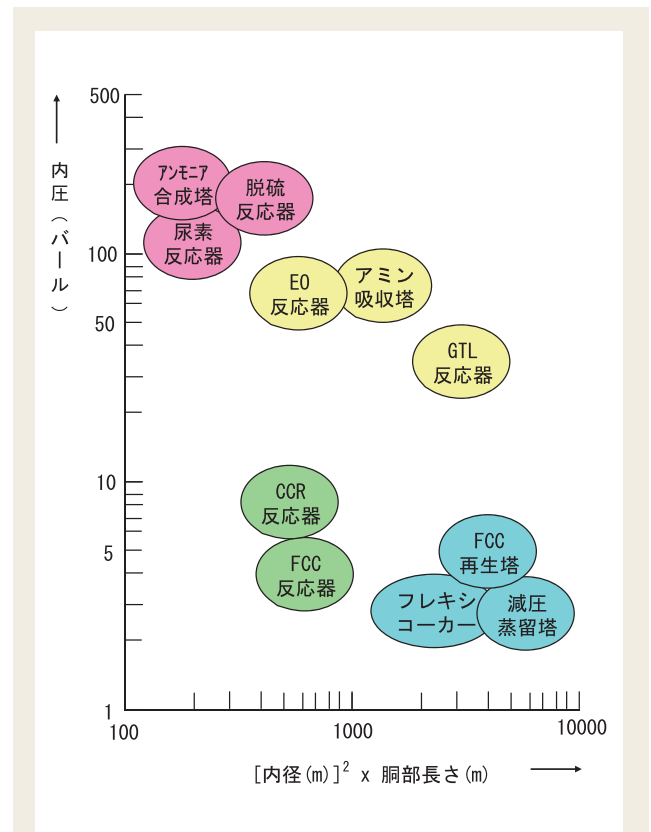


図5 各種容器の寸法・圧力分布

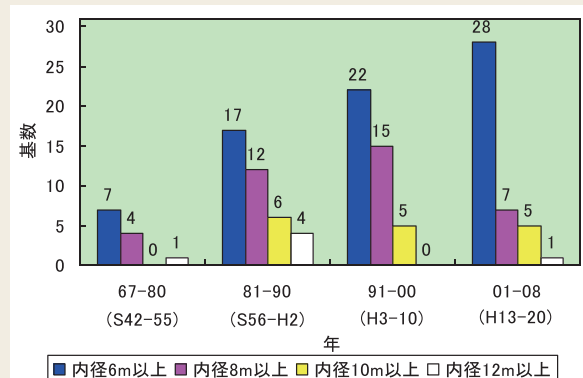


図6 大型容器の製作実績の推移

図6に内径が、6m、8m、10mならびに12mを超える大型容器の実績を示す。S56-H2の実績には、10m、12mを超える大型容器が多く含まれる。H3-10の大型の実績はGTL反応器がほとんどで、傾向として超大型容器 (図5の青群) から反応器 (図5の赤群) へ移行している。

2.3.7 海外工事への新展開

(1) **海外協業** 建屋内の製作に固執しない発想で、海外協業に挑戦した。陸送が困難なカナダ内陸部のプラントへ大型多管式EO反応器を納入するため

- ・管板、胴、鏡板、ノズルなどの半製品を有明で製作。
- ・現地のダクロ社へ陸送して、有明から派遣のSVのもと、組立、管挿入、耐圧試験を行い、工事を完遂。

(2) **海外エンジニアリング事業** 製作自体に固執しない発想で、海外エンジニアリング事業に挑戦した。

- ・内作に不適な中小容器の営業と基本設計を当社が担当
 - ・製作をルーマニアのグリロ社やビルマール社、あるいはインドネシアのテキスマコ社が担当
- 設計、製造のスタッフを常駐させ、エンジニアリング会社にはない強みを発揮した。

2.3.8 **SASOLのGTL反応器** 海外工事の経験が、平成8年から10年にかけて南アフリカのSASOL向け改良型石炭ガス液化反応器（GTL反応器）工事で開花した。

- (1) 7基分の46小ブロックを工場製作し、現地へ輸送。
- (2) サイト近くの組み立てヤードで大ブロック化。
- (3) サイトへ搬送し、大ブロックを最終組み立て。

最多60名の有明から派遣の作業員と、南アのコイル業者、ブロックの焼鈍業者、継手の放射線検査会社が連携して、これらの工程を7基分、繰り返した。(表3)

特筆すべき技術は

- ・ヤードとサイトでの組み立て周継手水平自動溶接
- ・ヤードでの組み立て式簡易炉を用いたブロック焼鈍
- ・稼働中のプラント内の搬送と据え付け
- ・サイトでの最終溶接、局部焼鈍、および放射線試験

表3 SASOL向けGTL反応器の概要

仕様	超大型反応器	大型反応器
内径 (m)	10.7	8.0
全長 (m)	41	40
重量 (トン/基)	1600	850
ブロック数/基	8	7
基数	4	3

周到な計画と緻密な管理のもとに、契約工期より26日早く完成させた。その一方、有明工場の受注および生産活動が中断しないように努めた。工事内容は平成12年、シドニーの「圧力容器技術国際会議」で発表した。

2.3.9 **PLNGプロジェクト** 天然ガスが注目される中、米国石油メジャーが、従来の低圧・極低温LNG船と異なる中圧・中低温のPLNG船を開発した。同社は中圧でも薄肉化・軽量化が可能な高強度低合金鋼を開発し、従来のアルミ製球形タンクでもない

独立型円筒タンクを多数搭載する船を考案する一方、LNG基地の天然ガス液化装置を中温化することでコスト・ダウンを図った。日立造船は、有明工場の船部門と陸部門が共同で、船とタンクのコスト検討に参画した。陸部門は1日2基製作可能なPLNG容器の自動化工場を計画し、レーザー溶接とTOFD UTの適用を試みた。しかし従来型天然ガス基地の建設費とLNG船の船価が大幅に低下し、最大の天然ガス産出国が天然ガス供給政策を変更したため、PLNG計画は凍結された。その後TOFD UTがASMEコードに採用されて、高温高压容器の非破壊検査に不可欠となり、レーザー溶接は、圧力容器の内部品に適用の場を見出した。

2.3.10 **設備増強** 平成9年、桜島工場の有明移転に伴って、陸機工場を50%以上延長し、エンジンの組み立てとプロセス機器の製作に当てることになった。

平成19年、天井クレーン2基の相吊りで700トンの組み立てが可能な工場を増設し(図7)、同22年には積み出し用500トン・ジブ・クレーン1基を設置した。



図7 平成21年現在の有明工場陸部門の全景

平成19年、2000トン級容器の最終組み立て用に、フローティング・クレーンの手配に有利な堺工場のドックを、幅10m、長さ90mにわたって地盤補強し、水圧試験時重量5000トンに耐える剛基盤を確保した(図8)。



図8 堺工場組み立ての1160トンEO反応器

2.3.11 2.25Cr-1Mo-V鋼製脱硫リアクターブーム

(1) 当社は平成5年から、鉄鋼メーカーと、高強度高温材料の2.25Cr-1Mo-V鋼に関する共同開発を行い、この鋼種がASMEコードに採用されるといち早く、この材料の容器を受注し、先発メーカーの仲間入りをした。

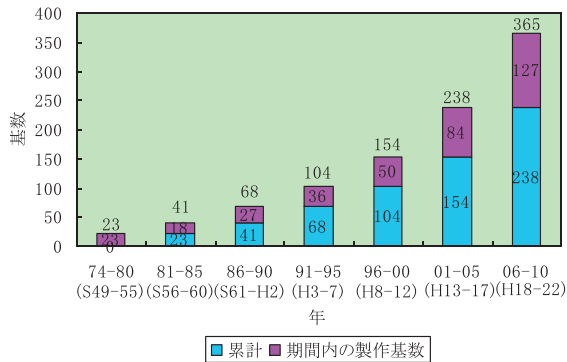


図9 ASME U2スタンプ
適用容器の製作実績

(2) 北京オリンピックで鋼材価格が高騰したが、米国の排ガス規制強化によって北米の製油所では脱硫反応器の増設ラッシュとなった(図9)。

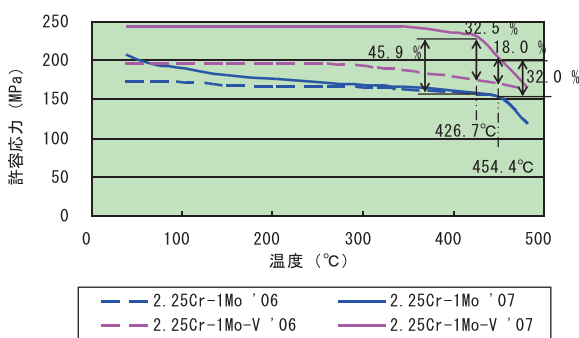


図10 Cr-Mo鋼およびCr-Mo-V鋼の許容応力

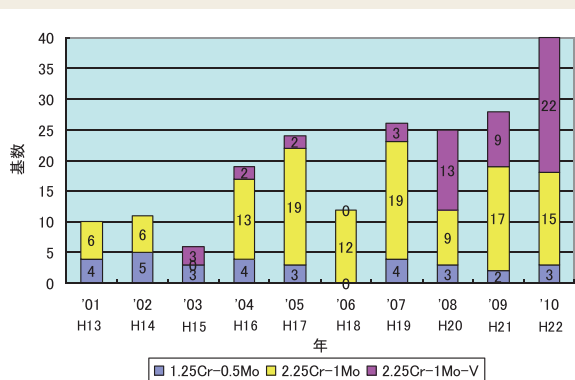


図11 Cr-Mo鋼製リアクターの製作実績

- (3) 2007年版ASMEコードの改訂で、2.25Cr-1Mo-V鋼の許容応力が大幅に高くなり(図10)、2.25Cr-1Mo鋼より著しく重量軽減ができるようになった。平成20年以降、2.25Cr-1Mo-V鋼製容器の受注が、2.25Cr-1Mo鋼製容器を上回る勢いで増加した(図11)。その反面、クリープなどの非弾性解析も要求されることになった。
- (4) 2008年、欧州製の2.25-1Mo-V鋼製脱硫反応器の溶接継手に多数のホット・クラックが検出され、日本製のものには皆無という事態が発生した。原因は欧州製溶材と日本製溶材の成分の違いと判明したが、ASMEコードは、欠陥検出能力に優れたTOFD UTをSAW継手に義務付け、客先にもスペックを厳しくする動きが現れた。
- (5) 北京オリンピック後、鋼材価格の高騰は沈静化した。2008年秋、米国で発生したリーマン・ショックの影響で、北米での脱硫反応器熱は急速に冷めた。

2.4 プロセス機器の将来展望 平成19～22年、プロセス機器の売上げは以前の4～5倍に達した。リーマン・ショック後、受注に影響が出ているが、次のような明るい材料も見られる。

- (1) ASME 2007年版の改訂でV添加鋼の許容応力が大幅に高くなったため、製品重量を著しく軽減できるようになった。さらに鋼材価格が以前の水準に戻ってきたので、脱硫反応器価格に2重の割安感が出て、需要復活への起爆剤になることが期待される。
- (2) 前述のコード改訂で、それまでは鍛造でしか製作できなかった極厚容器が、板巻き工法でも可能な厚さになって、当社が参入できるようになった。
- (3) 世界最大の市場である中国内陸部にGTL反応器を設置するプロジェクトが生まれつつある。当社はSASOLの登録メーカーとして南アでの現地組み立ての経験を活かすことができる。
- (4) 高温強度が低下しない新材料(9Cr-V鋼)が石炭のガス化に出現してきた。SASOL同様、石炭が豊富な中国でGTLにつながるガス化容器として期待される。
- (5) 環境に優しく、現地工事量をミニマムにできる利点から、500トン級の陸送可能な陸上モジュールが出現しており、今後市場の拡大が期待される。
- 他方、板巻き容器の開先に、鍛造容器と同様、機械加工を要求したり、ノズル取付けにSAWを用いてTOFD UT試験を要求する客先が出てきた。客先ニーズを先取りし、設備と技術を充実させていかなければならない。

3. 原子力機器

国内での原子力発電時代の到来及び原子力第1船の

建造開始に呼応し、昭和44年12月、当社ではそれまでの研究開発及び企画主体の組織から発展し、開発事業本部原子力部が設立され、原子力船とキャスクの開発・事業化に向け本格的に取り組むことになった。ここでは、その後の原子力事業の歩みについて述べる。

3.1 原子力船の開発 昭和47年2月、独自の原子力商船「オット・ハーン」の設計を担当したINTERATOM社と一体型船用原子炉に関する技術提携を締結し、国内の原子力第1船「むつ」に続く、次世代原子力船の開発に着手した。しかし、「むつ」が昭和49年9月、出力上昇試験中に放射線洩れ事故を起こした結果、日本における原子力船開発は頓挫してしまい、当社の原子力船開発も撤退を余儀なくされた。ただし当社としては、放射線洩れ事故後、当時の原子力船開発事業団（昭和60年、日本原子力研究所（当時）に統合）に技術者を派遣し「むつ」の遮へい改修の設計、工事に協力した。更に、実験航海終了後の「むつ」の廃船の際には、原子炉部分を記念館として展示するための工事の一部も請け負った。この時点をもって当社は原子力船開発に区切りをつけた形となったが、INTERATOM社との技術提携により得られた原子力特有の技術、即ち、熱・臨界等の炉心設計、遮へい設計、構造設計技術は、キャスクに限らず、その後の放射性廃棄物処理設備等原子力関係のエンジニアリングにおいてその基礎とすることができた。

3.2 キャスク事業の歩み

(1) キャスクの開発段階 キャスクについては、まず、昭和45年に米国NLI社と技術提携を行い、技術者を派遣し鉛タイプキャスクの設計・製造技術の習得を行った。昭和48年、キャスクは商業化を目指して開発事業本部から陸機事業本部に移管された。

昭和51年12月には、各電力会社の協力により、国産の使用済燃料輸送キャスクとして初めて国からの設計承認を取得した。その結果、昭和52年にPWR用キャスク2基、BWR用キャスク2基を受注し、昭和53年に国産1号機のHZ-75Tキャスクを納入した。この実績により当社は我が国における使用済燃料輸送キャスクの第1人者としての地位を築くことができた。

(2) 輸送キャスク HZ-75Tキャスクは、各原子力発電所から旧動燃（現、(独)日本原子力研究開発機構）東海再処理工場への使用済燃料輸送に使用されるものであるが、本キャスクの運用については、電力会社の要請により、昭和52年、伊藤忠商事(株)とともにオーシャンキャスクリース(株)（現、(株)オー・シー・エル）を設立した。

その後しばらくは国内輸送用の大型キャスクの需要はなく、昭和50年代後半から昭和60年代前半にかけて、海外再処理用輸送キャスクとして英国での再処理用にEXCELLOXキャスク、仏国での再処理用にTNキャスク、計21基を納入した。

昭和60年6月、関連部署が原子力事業部に改組され、営業と設計が一体運営される組織となり、原子力事業

の第2世代に入った。この事業部化によりキャスクに加えて原子力発電所や核燃料施設向けの機器の受注に向けて幅広く注力する体制となった。

昭和62年からは、計画中の六ヶ所再処理工場向けのキャスク（収納体数を最大限とする意味から高性能キャスクと称された）の開発のために電力各社からの委託研究が開始され、当社もこの開発に参画し、平成2年からは原燃輸送(株)からの委託により実証試験を実施しつつ、計6タイプのキャスクの開発・設計・安全解析が行われた。この開発には当社の他に、三菱重工業、神戸製鋼所、三井造船が参加し、その中で当社が幹事会社を努めた。原燃輸送(株)（略称NFT）は平成6年には設計承認を取得し、平成7年度にはNFTキャスクとして総数40基が発注された。当社はPWR用のNFT-14Pキャスク7基（**図12**）、NFT-10Pキャスク3基の計10基を受注し、平成12年度に納入を完了した。このNFTキャスクは桜島工場で作成したが、有明移転前の桜島工場最後の工事となったものである。



図12 輸送キャスク(NFT14P)

このNFTキャスクの製造に関しては、平成10年10月に当社等キャスクメーカーの下請け会社であるレジン施工会社におけるデータ改ざん問題が発覚し、同年12月、容器承認を返却し、翌年11年6月に再取得したという経緯がある。当社等キャスクメーカーは再発防止対策のために品質監査体制の強化を行なった。

NFTキャスクの発注は第2期、第3期と続いてきたが、この内、当社は第3期においては発電所構内輸送も含めPWR用7基を受注し、平成20年度に納入した。

(3) 貯蔵キャスク NFTキャスクも第3期以降は需要が低下したが、それに対し浮上してきたのが、貯蔵キャスクの需要である。六ヶ所再処理工場の能力が現在運転中の原子力発電所からの使用済燃料発生量より不足していることから、一時的に燃料を貯蔵するためのものである。

当社は平成7年に日本原子力発電(株)から東海第二発電所向け乾式貯蔵キャスク7基を受注し、貯蔵キャスクとしての設計・許認可手続きを経て製作を行い平成13年に納入した。引き続き第2期として8基を受注し、平成15年に納入した。これら計15基全てに使用済燃料が収納されており、初期のキャスクでは8年間供用後の開放点検において正常であることが確認された。(冒

頭の写真：「貯蔵キャスク」参照)

(4) **輸送・貯蔵キャスク** 東京電力(株)と日本原子力発電(株)は共同で青森県むつ市にリサイクル燃料貯蔵(株) (RFS) を設立し、国内初の発電所施設外使用済燃料中間貯蔵施設の建設を開始した。このプロジェクトに関して、当社は平成15年に行われた設計コンペでは4社に選ばれたものの、平成18年に行われたハードの入札では残念ながら大量受注を達成することはできなかった。

この中間貯蔵用のキャスクは、最初に発電所から貯蔵施設への輸送され、約50年に亘る貯蔵後に再処理工場へ搬出されることから、輸送・貯蔵兼用としての機能・安全性が要求されるものである。今後は中間貯蔵用輸送・貯蔵兼用キャスクの需要拡大が見込めることから当社も技術とコストで他社に負けない実力を備えていく必要がある。

(5) **米国向けキャニスター** 米国向けの初のキャスク納入は昭和63年の貯蔵キャスクNAC-100STである。本格的な米国キャスク、キャニスター市場への参入は平成11年にNAC社よりYankee電力のYankee Rowe発電所及びConnecticut Yankee発電所向けキャニスターの大量受注(計59基)がきっかけである(図13)。



図13 キャニスター・バスケット

その後、平成13年にTN社からキャニスター10基を初受注し、以後、平成22年12月現在までの11年間に米国向け受注累計はキャニスター555基、キャスク12基に昇る。これらキャニスターの製作において要求される高い製作・組立精度を克服するとともに、キャニスター事業開始以来4回にわたる米国原子力規制委員会(NRC)の監査にも合格し品質保証体制とその実施の面でも良い評価を受けている。

(6) **その他のキャスク** 使用済燃料用キャスクとしては、上記の原子力発電所以外に「常陽」、「もんじゅ」や研究炉用燃料等の輸送キャスクも多数実績があり、さらに、使用済燃料用以外としては放射性廃棄物用キャスク等多種多様のキャスクも手がけてきた。また、発電所等でキャスクを取扱う際に必要となる設

備、即ち、水平・垂直吊具も納入してきた。

3.3 **その他の事業** キャスク以外の機器としては、原子力発電所の補助系や放射性廃棄物処理設備用の熱交換器やタンク類、配管モジュール、さらに旧原研・旧動燃向けに各種の設備・機器を納入してきた。その中で特筆すべきは、当社の産業廃棄物焼却技術から派生した放射性廃棄物焼却設備である。昭和55年に農林水産省畜産試験場向けに納入したRI焼却処理装置(処理容量20Kg/H)に続き、昭和62年には旧動燃向けのプルトニウム廃棄物焼却設備(PWTF、処理容量50Kg/H)、平成3年には旧動燃再処理工場向けに β ・ γ 焼却炉(IF、処理容量35Kg/H)を納入した。IF焼却炉は現在も順調に運転されており廃棄物の減量に大いに貢献している。

不燃性の廃棄物処理として、昭和63年に高圧縮廃棄物減容プレス(1500トン油圧プレス)を日本アイソトープ協会柏事業所に納入し、その経験を生かし、日本原燃(株)六ヶ所再処理工場向けに減容プレス(1500トン油圧プレス)を受注し平成15年に納入した。

国内では東京電力柏崎刈羽7号機以降、エネルギー需給の関係から原子力発電所建設の件数は急激に減少するが、代わって大型プロジェクトとして脚光を浴びたのが、日本原燃(株)の六ヶ所再処理工場の建設である。平成5年に着工となったこの再処理工場向けには多種多様の機器・設備を納入してきた。主な容器として、臨界防止を考慮した環状層(平成11年納入)、耐食性を考慮したエンドピース酸・水洗浄層(平成14年納入)、また設備としては前述の減容プレス、MOX粉末貯蔵容器取扱設備(平成13年納入)等がある。合わせて、再処理施設の製品であるMOX粉末を貯蔵するダブルカバーシステムという特殊技術を備えた容器、並びにウラン酸化物貯蔵容器を多数納入している。

旧動燃向けには高速増殖炉向けの研究のための種々のナループ試験設備や「もんじゅ」への供給用Na大型タンクを納入しており、当社はナトリウム取扱機器にも技術的知見を有している。

3.4 キャスク技術

3.4.1 **設計及び許認可** ここでは、今後の需要の中心となるのは中間貯蔵用の輸送・貯蔵キャスクの設計ならびに許認可について記す。

貯蔵キャスクは、数十年にわたる貯蔵期間中において基本的安全機能を維持し、また貯蔵後の輸送に対して安全機能を有し、かつ収納する使用済燃料の健全性を維持できるものでなければならない。輸送・貯蔵キャスクは十分な未臨界性、遮へい・除熱・密封性能及び構造強度が要求される一方で、経済面からは出来るだけ収納体数を大きくし輸送や貯蔵の効率を上げることが要求される。その設計は、日本原子力学会標準「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査標準」(最新版2010年10月)や機械学会基準「金属キャスク構造規格」に従って行われなければならない。法的規制の流れとして、事業者が行う貯蔵施設の

事業化申請後、国の安全審査においてキャスクは安全設計と検査についての審査を受ける。事業許可後、設計及び工事認可（設工認）申請を行い、合わせて輸送容器としての設計承認申請を行なう。設工認認可後かつ設計承認後、製造に着手することになる。設工認・容器承認の両方の製造時検査を受けキャスクが完成する。キャスクメーカーは事業化申請のための安全評価、工事認可書類、輸送容器としての安全解析書の作成等を行なうものである。

なお、当社は材料需給状況に柔軟に対応できるよう鉛タイプと鍛造タイプの2種類のキャスクの設計・製造が可能である。

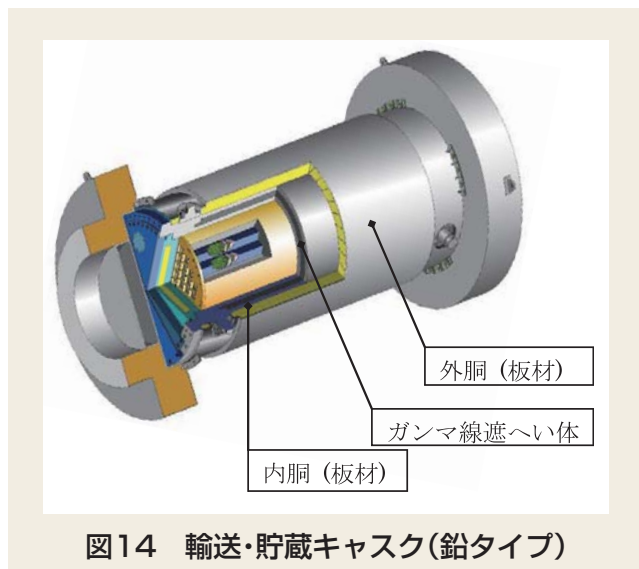


図14 輸送・貯蔵キャスク(鉛タイプ)

3.4.2 技術開発 約40年にわたるキャスク事業においては、種々の技術開発を行ってきたが、今後の主流となる輸送・貯蔵キャスクに対しては、1) ボロン入りアルミ角チューブの開発、2) 硬質ウレタンフォームからなる新型緩衝材（R-PUF）の開発、3) 中性子遮へい材NS-4-FRの技術取得等の技術開発を行ってきた。また、安全審査対応として平成15年には1/3モデルによる落下試験を行い、落下時の密封健全性を確認している（図15）。



図15 輸送・貯蔵キャスク落下試験

3.4.3 製造技術・生産能力 当社のキャスクは冒頭に述べたように、昭和45年の米国NLI社からの鉛タイプキャスクの製造技術導入から始まった。今や、鉛鑄込み、鉛部のガンマプローブテスト等の関連技術を含め、当社の鉛タイプキャスクの製造技術は世界トップレベルである。燃料仕様に応じて鉛タイプの長所を生かして、今後の需要に対応することが可能である。

また、米国向けのキャニスター製造においては中性子吸収材のカバーの溶接や角チューブの溶接に適用したレーザ溶接、バスケットレールの固定に用いられる栓溶接や自動溶接は製品の製缶公差と生産効率の向上に大いに寄与している。

昭和52年のHZ-75Tキャスクの製造開始以来、当社発祥の地、桜島工場で多くのキャスクや原子力機器の製造を行ってきたが、平成9年のNFTキャスクの製造を最後にキャスクの製造は有明工場に移転した。

有明工場ではキャスク専用工場を有し、米国PCC社向けTN-68バスケット、NAC社向けキャニスターの製造、日本原燃向けCB/BP運搬用キャスク、原電東海向け貯蔵キャスク、さらに六ヶ所再処理工場向け環状槽等ステンレス容器の製作が効率良く行われてきた。平成12年からは米国TN社からのキャニスターの製作も始まり、キャニスターとキャスクの共同生産が継続的に始まった。

今後の貯蔵キャスクの需要をにらみ平成22年にはキャスク工場を2.5倍に拡張した。これによりさらに生産効率を高めることができる。

3.5 原子力機器の将来展望 原子力船とキャスクから始まった当社原子力事業は40年をこえて、キャスクメーカーとして世界的に認められるようになった。

原子力発電所の運転が継続される限り、使用済燃料が排出されるのでキャスクの需要は継続する。今後も、安全性、経済性でさらに優れたキャスクや新型キャスクの実現を目指して、技術開発、技術者養成に大いに注力すべきである。

また、当社はキャスク以外にも原子力発電所用機器、廃棄物処理設備等種々の機器・設備も手がけて来た。これらの実績・経験を生かし、現在手続き中のASME Nスタンプ取得により、今後は国外での原子力発電所向けの機器サプライヤーとしての参入を期待するものである。

4. まとめ

4.1 プロセス機器 2章で当社のプロセス機器の歩みと将来展望について述べた。当社は化学工業の黎明期においてすでに、造船会社固有の造機の設備・能力を活かしてプロセス機器を製作し、産業の発展に貢献していた事例を紹介した。

経済成長期には、当社が臨海工業地帯の石油コンビ

ナートで建設された石油精製および石油化学装置に対して、種々のプロセス機器を納入した事例を紹介した。技術の進歩と産業界のニーズに対応して、電算化の推進、多層容器分野への進出、高温高圧技術の開発、CBIとの技術提携、有明新陸機工場の建設、超大型容器の製作、海外協業およびエンジニアリング展開、GTL反応器の工場プレ・ファブおよび現地組み立て、V添加の高強度高温材を用いた脱硫反応器の製作などに挑戦した事例についても述べた。

本文で触れていないが、LNGプラント用ステンレス鋼、9%ニッケル鋼ならびに3.5%ニッケル鋼低温容器、および超臨界ステンレス鋼鍛造容器の製作実績も有する。プロセス機器の歩みは、厳しい経済環境と国際競争の中で生き残るために、技術向上と設備高度化に基づくコスト競争の歴史であり（図16）、先輩たちのご苦労

とご努力のおかげで日立造船の名を、プロセス機器分野で世界に広めることができた。心より敬意を表するとともに、感謝申し上げます。

また本稿を執筆するに際して、太田 碩氏に多くの資料を提供していただいた。さらに林 良三氏、正木 良樹氏、山田 勝幸氏、松浦 健次氏、安井 才一氏にも有益な助言をいただいた。ここに厚くお礼申し上げます。

4.2 原子力機器

3章で当社における原子力船開発およびキャスク業界のパイオニアとしてのキャスク開発について紹介すると同時に、輸送キャスクや貯蔵キャスク、キャニスターなどの原子力機器事業の沿革、ならびにキャスクの設計および許認可、技術開発、製造設備などについて述べた。さらに種々の放射性廃棄物処理施設や機器事業について紹介した。

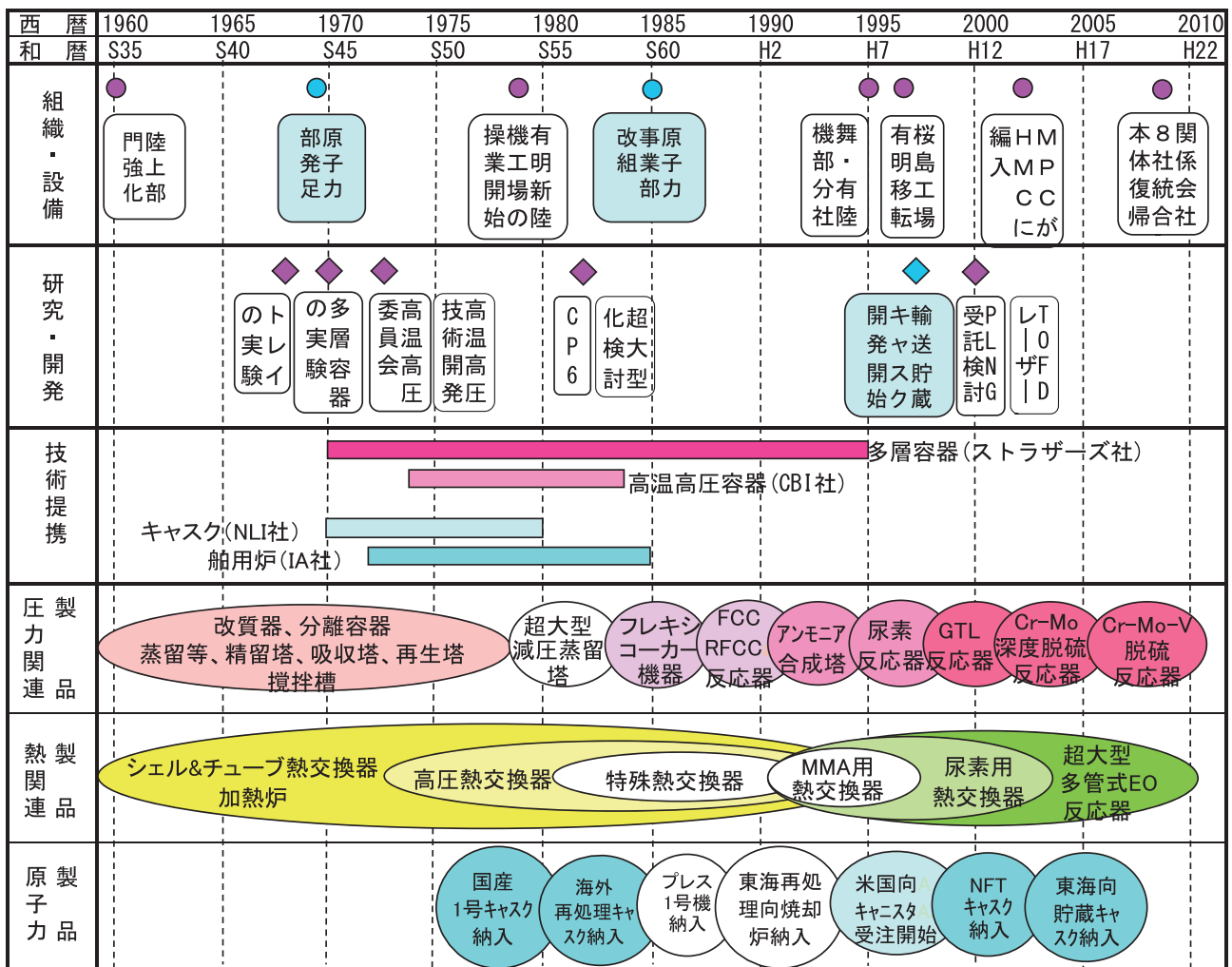


図16 プロセス・原子力機器の歩み

参考文献

- (1) 太田 碩ほか：球形タンク支持脚付近の局部応力，日立造船技報，**1965**，26 (1/2)，27-32.
- (2) 吉田 信之ほか：大口径多孔板トレイの圧力損失，日立造船技報，**1971**，32 (1)，54-60.
- (3) 坂本 勲ほか：マルチウォール（高圧層成円筒）の強度に関する実験的研究，日立造船技報，**1971**，34 (4)，1-10
- (4) 辻 輝夫：圧力容器の解析解による応力解析，日立造船技報，**1973**，34 (3)，7-13.
- (5) 保田 連ほか：圧力容器の設計，日立造船技報，**1975**，36 (4)，3-10.
- (6) 増田 義雄：高温域の圧力容器の設計手法，日立造船技報，**1975**，36 (4)，3-10.
- (7) 山田 勝幸，南本 陽二郎：極厚圧力容器の製作と品質保証，日立造船技報，**1975**，36 (4)，17-24.
- (8) 藤原 裕彦，植田 正弘：有限要素法によるノズル部の三次元応力解析と自動要素分割プログラム，日立造船技報，**1975**，36 (4)，25-32.
- (9) 乙部 博：厚肉軸対称応力解析用プログラムの解の精度について，日立造船技報，**1975**，36 (4)，33-39.
- (10) 西本 晃也，中谷 高久：塔槽類の耐震解析，日立造船技報，**1975**，36 (4)，40-44.
- (11) 高木 十三雄，鈴木 公爾：2 1/4Cr-1Mo鋼鍛造品の熱処理特性，日立造船技報，**1975**，36 (4)，45-52.
- (12) 藤井 忠臣，高木 十三雄：厚板調質2 1/4Cr-1Mo鋼へのエレクトロスラグ溶接の適用に関する研究，日立造船技報，**1975**，36 (4)，53-61.
- (13) 大沢 守彦ほか：極厚板2 1/4Cr-1Mo鋼の焼入れ冷却条件の検討，日立造船技報，**1975**，36 (4)，62-69.
- (14) 藤井 忠臣，白木 良典：厚板低合金鋼の低温割れ防止に関する研究，日立造船技報，**1975**，36 (4)，70-77.
- (15) 佐藤 隆：圧力容器内面に対するステンレス鋼の肉盛溶接，日立造船技報，**1975**，36 (4)，78-83.
- (16) 大西 忠昭ほか：極厚鋼板溶接部のマルチプローブ・タンデム探傷法による超音波探傷試験，日立造船技報，**1975**，36 (4)，84-89.
- (17) 原 洋一ほか：高温高圧用圧力容器の模型実験，日立造船技報，**1975**，36 (4)，95-106.
- (18) 峰久 節治ほか：厚板突合せ継手に対する狭開先溶接法の運用，日立造船技報，**1977**，38 (4)，9-17.
- (19) 峰久 節治ほか：厚板円筒突合せ継手に対する狭開先溶接における溶接変形，日立造船技報，**1980**，41 (1)，24-27.
- (20) 峰久 節治ほか：厚板突合せ継手に対する狭開先溶接法の確立，日立造船技報，**1983**，44 (1)，35-42.
- (21) 古田 庄五ほか：超大型容器における新工作法の確立，日立造船技報，**1971**，44 (3)，29-36.
- (22) 植田 正弘ほか：マルチウォール容器の伝熱特性，日立造船技報，**1985**，46 (2)，8-15.
- (23) 中島 宏幸ほか：プラント機器の溶接，日立造船技報，**1993**，54 (3)，29-37.
- (24) 中島 宏幸ほか：南アフリカSASOL向け超大型反応器の工場製作と現地組立て，日立造船技報，**1999**，60 (1)，33-41.
- (25) 辻 輝夫ほか：高温高圧容器，日立造船技報，**2009**，70 (1)，46-51.

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 機械・インフラ本部
辻 輝夫

Tel : 06-6569-0054 Fax : 06-6569-0055

e-mail : tsuji@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation

Machinery & Infrastructure Headquarters

Teruo Tsuji

Tel: +81-6-6569-0054 Fax: +81-6-6569-0055

e-mail: tsuji@hitachizosen.co.jp



辻 輝 夫



岩 男 義 明