

© 1989 ISIJ

## 重工業 30 年の歩みと今後の展開

特別講演

雑 賀 喜 規\*

Progress in Heavy Industries ; in the  
Past 30 Years and in the Future

Yoshinori SAIGA

## 1. ま え が き

日本の重工業は 1950 年の朝鮮動乱を契機として急速に発展したことは衆知のとおりである。とくに第 2 次石油ショック頃までの約 30 年の進歩発展には目覚ましいものがある。いわゆる高度成長期と言われる時代であつて、欧米よりの導入技術を十分に咀嚼し、改良し世の中のニーズに応じてきた。

今回は鉄鋼材料の進歩より見た重工業の足跡を振り返つて見ると共に、今後の展開についても所見を述べてみたい。

## 2. 造船用鋼材とその溶接の進歩

## 2.1 造船戦後の歩み

Table 1 は造船戦後の歩みとして世界における主な出来事や、鋼材開発と溶接技術の変遷を示したものである。1950 年代には SAW (サブマージド・アーク溶接) が導入されているが、当時の鋼材は硫黄の含有量が高くサルファクラックと呼ばれる溶接割れが多発して苦勞したものである。1960 年代にはタンカー船の大型化により片面自動溶接が採用され鋼材の溶接性、低温靱性などの機械的特性の高いものが要求され低温高靱性の清浄鋼が開発された。また一方 LPG (液化プロパンガス) 船用には調質型低炭素アルミキルド鋼が出現した。

1970 年代には CO<sub>2</sub> ノンガス半自動溶接の適用や鋼材では大入熱対策鋼が開発されている。1980 年代には TMCP (加工熱処理) 鋼が開発され、さらに高張力化、高靱性化が進んだ。この TMCP 鋼の技術は我が国が開発したすばらしい技術である。しかしながら第一次、第二次石油ショックにより省エネ化は進み、また一方、第三国の勢力増大、円高などにより日本の造船界は後退せざるを得ない状態になつた。このような事態になつて技術的には省エネ化技術の促進、省人化のための高度自動

化技術の進歩、コスト的には円高を克服できる新しい生産システムの開発など多くの課題を着々と解決する努力が払われている。

Table 2 は造船における溶接施行の変遷を示すものであるが 1955 年代では手溶接が 100% であつたものが現在では 10% に、近い将来には 5% までに減り、自動化が進むことになる。この傾向は一つにはコストの低減にあるが、さらに品質の安定と老齡化対策も重要な問題となつているからである。若い溶接士は減少する一方でこれをカバーするためにはハイテク技術を駆使した超自動化が大切である。

## 2.2 TMCP 鋼使用の効用

TMCP 鋼は、加工熱処理の効果によつて結晶粒が細かく切欠靱性が良好であるばかりでなく炭素量の低減や溶接割れ感受性を高める添加元素を低くすることができるため、ショートビードの制限、予熱温度の低下、溶接入熱の増大など溶接施工制限条項の緩和が可能である。すなわち、施工がしやすく、健全性、信頼性の高い溶接構造物が得られることになる。Table 3, 4 に予熱施工管理規準と溶接最大入熱量を示す。また加工熱処理の効果で強度が上昇するので高強度化率が向上し、その結果船殻重量が軽減するので載貨重量の増加につながることになる。ちなみにバルクキャリアの場合、YP 32 鋼 (降伏点 32 kgf/mm<sup>2</sup>) を 50% 使用すると約 10% の重量軽減となり、それだけ載貨重量が増えることになる。

Fig. 1 は当社のハイテン化率の推移を示すものであるがタンカーでは 70% にも達している。1987, 88 年では YP 40 (降伏点: 40 kgf/mm<sup>2</sup>) を採用しており、さらに高張力化に進んでいる。

## 3. 高張力鋼の開発と大型装置への適用

## 3.1 T-1 鋼の導入

1952 年、米国 US スティール社で引張強度 80

昭和 63 年 11 月本会講演大会における浅田賞受賞記念特別講演 平成元年 1 月 10 日受付 (Received Jan. 10, 1989)

\* 石川島播磨重工業(株)取締役技術本部長 (Director, Administrative General Manager, Technical Development, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., 3-2-16 Toyosu Koto-ku, Tokyo 135)

Key words : hull steel plate ; welding ; TMCP steel ; high tension steel ; T-1 steel ; fracture toughness ; 9%Ni steel ; super alloy (of gas turbine) ; single crystal super alloy ; composite material .

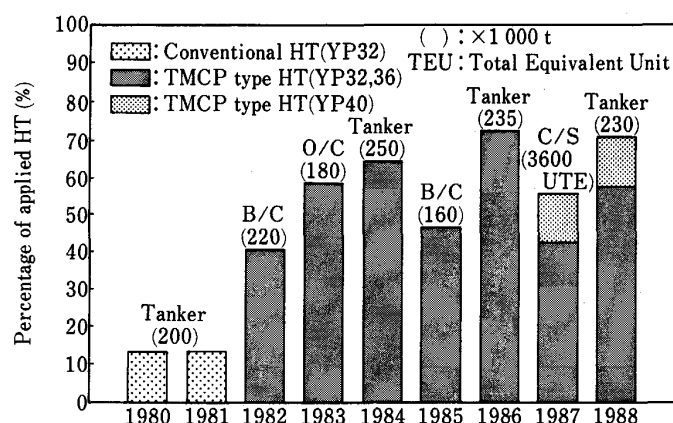
Table 1. History of shipbuilding after the second world war.

Year	Description	
	Shipbuilding	Welding and steel
1945	• Construction of all-welding ship (1 200 DWT) world's first	
1950	• Construction of 20 000 DWT class tanker	• Introduction of submerged arc welding
1955	• Introduction of 100 000 DWT class tanker • Construction of offshore jack-up rig "Hakuryo No. 1" • Advent of shipbuilding boom for export • Introduction of block construction method for shipbuilding • Construction of the Japan's first submarine after the second world war • Construction of the world's first LNG carrier (abroad)	• Widespread of gravity welding
1960	• Construction of the world's first LPG carrier • Increase in size of tanker • Trend of aft-bridge type	• Development of one side automatic welding
1965	• Achievement of No. 1 amount of shipbuilding • Construction of 310 000 DWT tanker • Antarctic observation ship M/S "Fuji" • Introduction of container ship • [Accident of large ship]	• Introduction of vertical automation welding (ESW, CESW, EGW) • Introduction of controlled-rolled steel (abroad)
1970	• Construction of the Japan's first nuclear powered ship "Mutsu", 370 000 DWT tanker, offshore jack-up rig "Hakuryo No." • Introduction of working unit construction method [The first oil crisis] • [Start of energy-saving]	• Widespread of CO <sub>2</sub> , non gas semi-automatic welding • Introduction of steel for large heat-input welding
1975	• Increase in strength of the developing Countries • Construction of 480 000 DWT tanker, 550 000 DWT tanker (France), and LNG carrier • [The second oil crisis] • Trimming of personnel and production facilities	• Introduction of advanced controlled-rolled steel
1980	• Construction of new type sail equipped tanker, fully-automated ship, 560 000 DWT tanker, and naval escort ship "Shirase" • Construction of mobile arctic caisson rig "MARK", and deep sea research vehicle "Shinkai 2000" • Accident of accommodation platform "Alexander I. Kielland" (oversea) • [Drop of oil price]	• Introduction of thermo-mechanical control process steel
1985	• Intensified depression in shipbuilding • Report to the Government on the cutting of production facilities (20%) • Decrease in demand for offshore structure	• Practical use of high tensile steel (YP-50)
In future	• Promotion of the development of energy-saving ship • Development of special-object ship	• High technologization, robotization, labor saving etc.

Table 2. Changes of welding method in shipbuilding.

Crowth period (1955 to 1965)	
Manual welding	100%
High growth period (1965 to 1975 ; mass production of huge ships)	
Manual welding	55%
Gravity welding	30%
Submerged arc welding	15%
Low growth period (1975 to date ; semi-and simplified automatic welding)	
CO <sub>2</sub> arc welding	40%
Gravity welding	30%
Submerged arc welding	20%
Manual welding	10%
Near future (Around 1990 ; robotization)	
Robotic welding	40%
CO <sub>2</sub> arc welding	20%
Submerged arc welding	20%
Gravity welding	15%
Manual welding	5%

kgf/mm<sup>2</sup> の高張力鋼 (T-1 鋼) が開発され, 小型タンク, アンモニア冷凍タンクなどに使用され, その機械的特性, 溶接性が高く評価され, 我が国でも 1954 年に導入された, T-1 鋼は少量ずつの Cu, Ni, Cr, Mo, V, B を添加して強度, 靱性, 耐食性, 溶接性がバランスよく改善されたもので, 焼入れ-焼もどし処理による焼もどしマルテンサイト組織を有するものである. そして 1956 年 T-1 鋼を用いた 10 万 Nm<sup>3</sup> の都市ガスホルダーが東



B/C: Bulk Carrier O/C: Ore Carrier C/S: Container Ship  
Fig. 1. Changes of percentage of applied high tensile steel (at IHI Kure Shipyard).

京に完成した. 当初は米国からの技術導入により施工が行われたが米国と日本の湿度の違いなどから溶接金属部の横割れの問題が多発したため, 溶接棒のベーキング, 保温や鋼板の予熱条件などが追加されたり改められた. 例えば当初では予熱はむしろ靱性を低下させるのでしな

Table 3. Comparison of preheating temperature of conventional and thermo mechanical control process type high tensile steel.

Conventional HT		TMCP type HT			
Season	Preheat Temperature	Steel	Thickness	Temperature	Preheat Temperature
Cold seasons (November to March)	≥100°C	YP-32 YP-36	≤35 mm	≤-5°C	≥20°C
Other seasons	≥75°C	YP-40	≤30 mm ≤50 mm	≤-5°C 5°C	≥20°C ≥20°C

Note : YP-32 ;  $\sigma_Y \geq 32 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $48 \text{ kgf/mm}^2 \leq \sigma_B \leq 60 \text{ kgf/mm}^2$   
 YP-36 ;  $\sigma_Y \geq 36 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $50 \text{ kgf/mm}^2 \leq \sigma_B \leq 63 \text{ kgf/mm}^2$   
 YP-40 ;  $\sigma_Y \geq 40 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $54 \text{ kgf/mm}^2 \leq \sigma_B \leq 64 \text{ kgf/mm}^2$

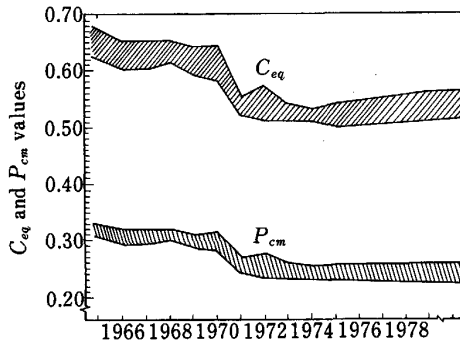


Fig. 2. Transition of  $C_{eq}$  and  $P_{cm}$  values of domestic HT80 steels.

い方がよいとの説明で予熱なしで溶接施工が行われた。溶接線は全線 X 線や磁気探傷検査が行われ、ラミネーションなどの層状欠陥に対しては超音波探傷検査が併用された。その結果として溶接棒の管理、施工条件の見直しが行われ、施行技術の安定化が計られた。

3.2 HT-80 の国産化

一方国産 HT 80 鋼の開発も 1960 年頃より進められ、1966 年頃には本格的に実用化されるようになった。そのためには製鉄メーカーとファブリケーターが一体となって国産溶接棒の開発、開先形状、寸法の変更、溶接入熱の許容制限値の設定、プレス加工精度の限界値を設けるなど施工基準の確立が行われた。Table 5 に HT 80 鋼と溶接施工技術の変遷を示す。鋼板については製鋼技術、熱処理技術の進歩・発達により低炭素当量の高張力鋼が開発され 1970 年以降では炭素当量 ( $C_{eq}$ ) で 0.50 ~ 0.55 まで下げることができるようになり溶接割れ感受性 ( $P_{cm}$ ) も非常に低減した。これを Fig. 2 に示す。また高張力鋼にとって最も重要な点の一つに溶接継手部の寸法精度と破壊靱性の関係がある。その検討結果の一例として Fig. 3 に HT 80 溶接継手の角変形、表面切欠付の広幅引張試験の結果を示す。図中角変形量  $e$  の値が大きくなると低温靱性が低下することが明らかである。現在の施工基準では  $e$  は 10 mm/m 以下に規定されている。この他、継手部の疲労試験など設計に心要な試験が行われ、数多くの球形ガスホルダーが製作されてい

Table 4. Welding procedure of thermo mechanical control process type high tensile steel.

Welding method	YP-32,36		YP-40	
	Thickness (mm)	Heat input (kJ/cm)	Thickness (mm)	Heat input (kJ/cm)
SAW*1	≤35	≤250	≤30	≤220
SAW*2	≤35	≤180	≤30	≤160
EGAS	≤35	≤270	≤30	≤240
CES	≤35	≤750	≤30	≤720

SAW\*1 : Submerged arc welding (Copper backing method)  
 SAW\*2 : Submerged arc welding (Flux backing method)  
 EGAS : Electro gas arc welding  
 CES : Consumable electroslag welding

る。さらに HT 80 の用途はガスホルダーなどの塔槽類のみならず、長大橋、海洋構造物や揚水発電所の水圧鉄管などにも使用されるようになった。

3.3 9% Ni 鋼の特性と溶接技術

我が国初の 9% Ni 鋼製 LNG タンクが完成したのは 1969 年であるが実用化の検討が始められたのは 1963 年である。その間溶接材料の選定、溶接施工条件の検討が行われ、さらに低温靱性などの低温特性についての確信試験を行い製作を開始した。はじめての大型低温構造物を製作するに当たり 3 年以上も前から十分な事前検討ができたことは技術者にとって幸いであつた。

材料面では焼もどし時にでてくるオーステナイト相の量と低温長時間下での組織安定性、低温靱性に対する影響など種々の実験検討が行われた。一方溶接施工に際しては溶接棒が Ni ベースで溶着金属がオーステナイトの非磁性材であるので 9% Ni 鋼板に多くの残留磁気があると磁気吹きと言う現象ができてアークが寄せられて溶接ができなくなる。そのためにはマグネットクレーンの使用をやめたり、脱磁処理をするなどの注意が払われた。

製鋼技術の面では電気炉から転炉精錬へ、さらには炉外製錬、真空脱ガス技術の向上により低 C 化、低 P 化、低 S 化や脱ガスによる非金属介在物の大幅な低減による鋼板の改善が行われた。また溶接技術の面では自動化の適用の拡大など LNG タンクの製造技術の進歩向上が計られた。

Table 5. Technical transitions on 80 kgf/mm<sup>2</sup> class high tensile strength steel (HT 80) and its welding.

Period	Steel	Welding procedure
1954~1960	Period of usage of imported HT steel (T-1 steel)	Study on fabrication procedure of T-1 steel
1955 1960	<ul style="list-style-type: none"> <li>○T-1 : Welded structural HT80 steel Ni-Cr-Mo-V-B Type <math>C_{eq}</math> (WES) : 0.55~0.60</li> <li>○Development of domestic HT60 steel</li> <li>○Development of domestic HT80 steel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○Welding process : SMAW</li> <li>○Welding rod : Imported (Atom-Arc)</li> <li>○Prevention of transverse crack in weld metal</li> <li>○Improvement of welding rod</li> <li>○Study on the fabrication conditions</li> </ul>
1961~1965	Period of development and study on domestic HT steels and their practical usages	Establishment of the welding procedure on domestic HT80 steel
1965	<ul style="list-style-type: none"> <li>○Development of WEL-TEN 80C (NSC) (IN treatment)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cr-Mo type</li> <li>• Good notch toughness.</li> <li>• Low sensitivity against sulfide corrosion cracking</li> <li>• Low sensitivity against SR cracking</li> </ul> </li> <li>○Applicability to low temperature service spherical tank</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○Development of domestic welding rod for HT80 (L-80)</li> <li>○Changing the groove geometry</li> <li>○Setting the maximum allowable heat input</li> <li>○Setting the allowable limit for fabrication Angular distortion + misalignment <math>\leq 15</math> mm/m</li> <li>○Adoption of ACI (Anti Crack Initiation) bead for low temperature service tank</li> <li>○Smooth grinding at toe of weld</li> </ul>
1966~1970	Period of full applications of domestic HT80 steel	Improvement of welding procedure and tightening of quality control
1970~1972	Improvement of weldability of welten 80C steel	Conclusive surveys on the conditions surrounding weld fabrication of large scale spherical tank
	<ul style="list-style-type: none"> <li>○Active developments on heavy thick low <math>C_{eq}</math> high strength steels for long span bridge, penstock etc.</li> <li>Development of low <math>C_{eq}</math> Welten 80C <math>C_{eq}</math> : 0.50~0.55</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○Histogram of <math>C_{eq}</math> on HT80 : 0.59~0.62</li> <li>○Measurement of weld joint restraint intensity of actual tank <math>\rightarrow 400\sim 800</math> kgf/mm<math>\cdot</math>mm</li> <li>○Survey on preheating and postheating conditions and control of welding rod at site</li> <li>○Survey on vapor partial pressure in the air inside and outside of spherical tank</li> <li>○Survey on the change of angular distortion during welding</li> </ul>
1972~	Practical usage of low $C_{eq}$ welten 80C	Improvement of fabrication procedure
		<ul style="list-style-type: none"> <li>○Control of angular distortion : <math>\leq 10</math> mm/m (Spherical tank guidance : 1978)</li> <li>○Full control of preheating and postheating at site</li> <li>Development of automatic controlled pre-and postheating burner</li> </ul>

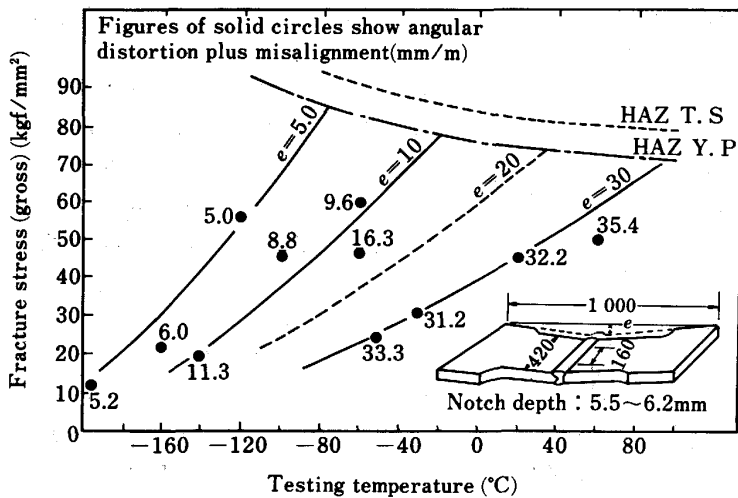


Fig. 3. Wide plate tension test results on HT80 weld joints with angular distortion and misalignment.

Table 6. Technical transitions on 9% Nickel steel and its welding.

Period	Steel and LNG tank	Welding procedure
1969	<p>Quenched and tempered 9% Ni steel (Electric furnace)</p> <p>○Construction of the first LNG storage tank in Japan made of 9% Ni steel Capacity : 35 000 kl</p> <p>○Problem of magnetic arc blow</p>	<p>Election of welding materials for cryogenic service and welding process</p> <p>Selection of welding materials (Inconel type) Comparison on weldability of imported and domestic welding materials                      ・ INCO-WELD A (DC)                      ・ YAWATA WELD B (AC)                      ・ INCONEL 182                      Selection of welding process                      → SMAW, MIG (semi-automatic)                      Survey on welding procedure</p>
1973~	<p>○Trend of large tanks Capacity : 60 000~75 000 kl</p> <p>○Tightening demagnetization treatment of plate <math>\leq 50</math> Gauss</p>	<p>Development of automatic welding process and practical applications</p> <p>Development of hastelloy type welding materials for automatic welding process</p>
1978~	<p>Development of converter 9% Ni steel and its practical usage</p> <p>○Changing steel making process Electric furnace → Converter</p>	<p>Development of high proof stress welding rods</p> <p><math>\sigma_{0.2} \geq 37 \text{ kgf/mm}^2</math>    <math>\sigma_B \geq 67 \text{ kgf/mm}^2</math>  <math>\sigma_{0.2} \geq 37 \text{ kgf/mm}^2</math>    <math>\sigma_B \geq 67 \text{ kgf/mm}^2</math>  <math>\sigma_{0.2} \geq 42 \text{ kgf/mm}^2</math>    <math>\sigma_B \geq 70 \text{ kgf/mm}^2</math></p> <p>Development of automatic welding apparatus                      Application of automatic welding                      Girth seam of shell plate → SAW (1973~)                      Vertical seam of shell plate → Automatic TIG (1975~)</p>
1980~	<p>Improvement of steel production : High toughness and cleanliness</p> <p>○Advancement of converter refining and ladle refining technics                      ○Advancement of vacuum degassing technics</p> <p>↓</p> <p>・ low C, P, S                      ・ Tremendous decrease of gas in steel                      ・ Tremendous decrease of non-metallic inclusions                      ・ Tremendous increase of fracture toughness in base metal and HAZ</p>	<p>Extended application of automatic welding processes and improvement of the quality of weld</p> <p>○Extended applications of automatic TIG                      ・ Shell plate (vertical butt joint)                      ・ Bottom plate (butt joint)                      ・ Annular plate (butt joint)                      ・ Roof plate (butt joint)</p> <p>○Extended application of SAW                      ・ Shell plate (horizontal butt joint)                      ・ Shell to annular plate (T-joint)</p> <p>○Improvement of welding fabrication methods                      ○Improvement of welding materials                      ○Improvement of joint design                      ○Advancement of non-destructive testing methods                      ○Maintenance of domestic rules and regulations</p>
1982~	<p>○Capacity enlargement of LNG tank Capacity : 80 000~100 000 kl</p> <p>Study on the applicability of converter made quenched and tempered, and direct quenched and tempered 9% Ni steel by Continuous casting process</p> <p>↓</p> <p>Same or superior properties of base metal and weld joint compared to those of 9% Ni steel by ingot process</p> <p>International joint research on arrest properties of 9% Ni and its weld joint</p> <p>↓</p>	
1988~	<p>Confirmation of the arrestability of LNG tank against brittle fracture</p> <p>○Survey on new type LNG ground tank Outer tank : PC concrete with metal liner Inner tank : 9% Ni steel</p> <p>○Survey on more enlargement of tank capacity                      ○Study on the properties of heavy thick 9% Ni steel</p>	

Table 6 に LNG タンク用 9% Ni 鋼とその溶接施工技術の変遷を示す。これらはすべて製鉄メーカーとファブリーケーターとの共同研究による成果である。

#### 4. 火力発電用高温材料

火力発電プラントにおける現状の蒸気条件と熱効率向上のための開発目標を Fig. 4 に示す。図中現状の蒸気条件 246 atg, 538/566°C に対し米国の EPRI (電力中央研究所) で開発が進められているステップ I ④では 316 atg, 593/593/593°C を目標としている。これ以上の蒸気条件では過熱管に強度と高温耐食性を考慮した二重管が使用されたり、主蒸気管には 9Cr 系や 18-8 系

のオーステナイトステンレス鋼が使用される。管類については日本でも 9Cr 系, Incoloy 800 系など製造実績があり製造上、溶接施工上問題はないが、問題なのはタービンローター機である。スーパー 12Cr や A 286 の超合金の使用が考えられている。この種の材料自身は開発材料とは言えないが大型鍛造材としてはまだまだ多くの解決すべき問題が残されている。これは高合金になればなるほど、また大型になればなるほど健全性が問題になるからである。

次に今後、国内で建設される大型火力発電プラントはほとんどが石炭火力であるので燃焼灰による高温腐食や各種エロージョン対策が重要でこれらの研究開発が行わ

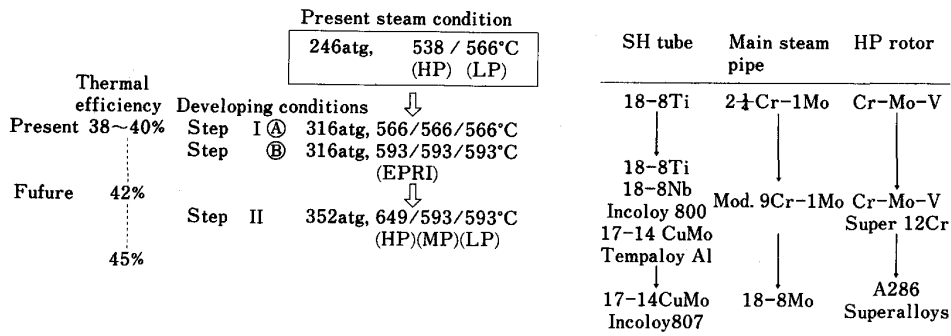


Fig. 4. Trends in steam conditions and candidate materials.

れている。また新素材としてファインセラミックのバルブ、バーナー、スプレーノズルなどへの適用が考えられている。

### 5. ハイテク時代の新素材

#### 5.1 航空機用ガスタービンエンジン

航空機用ガスタービンはジェットエンジンとして航空機の進歩発達ともあいまつて発展を続けており、技術の先端性と共に今後の期待も大きい分野である。

この分野における技術的な進歩は設計技術と材料の進歩とが車の両輪となって発展してきた。すなわち、ジェットエンジンの高温・高圧化、高速化とさらに航空機エンジンに要求される軽量化の歴史は材料の進歩発達の歴史でもある。この傾向は今後も変わることはないと考える。したがって複合材料も含めて新素材への期待は大きいものがあり、その開発と適用の努力は世界的な動向である。

ジェットエンジンを搭載した航空機が世界で最初にジェット飛行に成功したのはドイツで1939年であり、英国で1941年、米国で1942年である。我が国でも1941年頃からジェットエンジンの研究が進められ、1945年8月7日国産ジェットエンジン「ネ20」を積んだ双発機「橘花」が高度600m、12minの初飛行に成功している。

その後、各国においてジェットエンジンの実用化が進められ、今日の隆盛を迎えているが、その間のエンジンを構成する材料の重量割合の推移が多少の将来予想を含めて Fig. 5 に示す。当初は鉄鋼材料を主体としていたが、比強度の高いチタン合金や耐用温度の高いニッケル基およびコバルト基の耐熱合金が徐々に構成比率が増してきた。Table 7 に現用の F100 ターボファンエンジンの生産に必要な素材中の金属元素別重量とエンジンの素材別構成比を示すが、超合金と Ti 合金で 87% にもなり鋼は 11% に過ぎない。

さらに近来、推力・重量比の向上および燃料消費率の低減などに代表される航空エンジンの性能向上に関する意欲は、世界的に非常に強いものがある。推力・重量比を向上させるためには Fig. 6 に示すごとく各要素の効

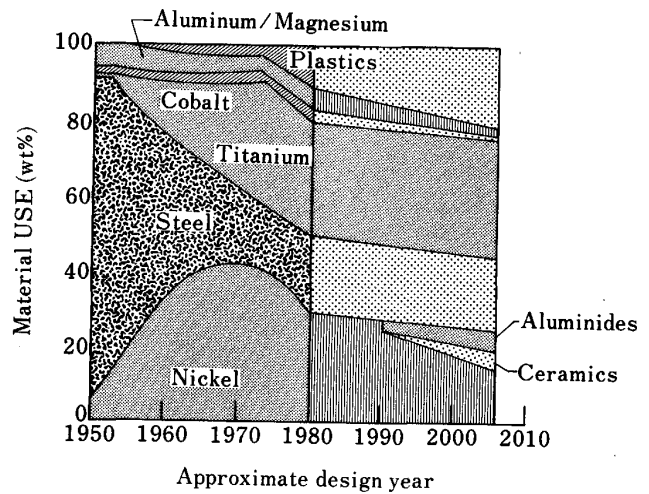


Fig. 5. Trends in aircraft gas turbine materials use.

Table 7. Weights of metals used in one F100 Turbofan Engine (1 400 kg).

Metal	Weight
Ti	2 468 kg(41.4%)
Ni	2 043 kg(34.2%)
Cr	674 kg(11.3%)
Co	401 kg(6.7%)
Al	304 kg(5.1%)
Nb	66 kg(1.1%)
Mn	1.0 kg(0.15%)
Ta	1.4 kg(0.05%)
Total	5 967.4 kg(100%)

Metallic makeup of engine	
Superalloys	51%
Ti alloys	36%
Steels	11%
Al alloys	2%

率の向上を計ること、また圧力比の上昇、タービン入口温度の上昇を計らねばならないが、これらの実現化のためには、従来材料より比強度の高い新素材、および耐熱温度の高い新素材が不可欠である。またエンジン全体の重量を軽減するためにも、低密度の材料あるいは比強度の高い材料が必要である。またこれら材料を真に必要な形や性能を持たせる成形・加工するプロセスの開発や

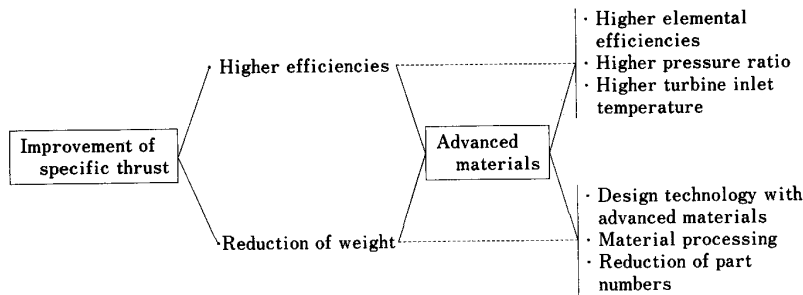


Fig. 6. Roles of advanced materials in improvement of performance of aeroengines.

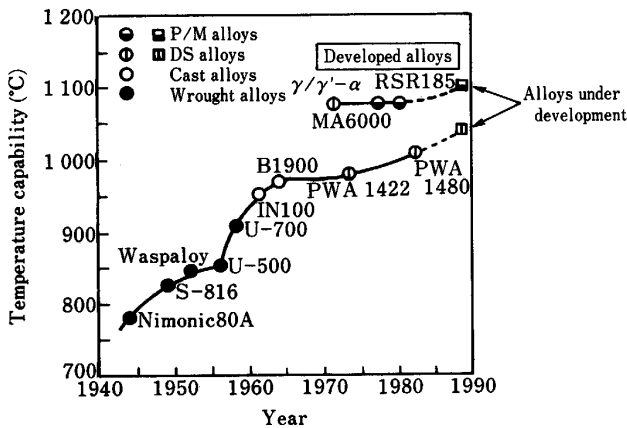


Fig. 7. Changes of temperature capabilities of turbine blade materials (Temperatures at which creep rupture life is 1 000 h under stress of 14 kgf/mm<sup>2</sup>).

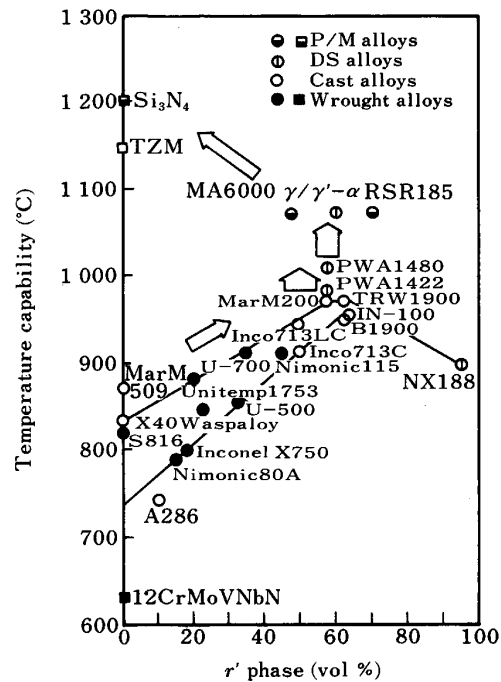


Fig. 8. Relationships between temperature capabilities and contents of r' phase of various Materials.

一体成形技術（ニアネットシェーブ技術）などが重要な課題である。

5.1.1 タービン用材料

燃焼ガス温度を上げ、タービン入口温度を上昇することは、ガスタービンエンジン全体の性能向上に直接的に寄与するため、この温度は年々上昇する傾向にある。これは耐熱合金の開発とその製造プロセスの進歩によるところが大きい。そして今日では、このタービン入口温度は1400°Cにも達している、タービンのペーンやブレードは直接この高温ガスが当たることになるが、もちろんこのような温度に耐える超合金材料はなく、今日のタービンの高温化は空気冷却技術によるところが大きい。Fig. 7 に過去 40 年間におけるタービンプレード用材料の変遷を示す。1960 年まではニッケル基あるいはコバルト基鍛造材により作られていたが 1960 年になり IN-100、B-1 900、René 80 などのニッケル基鍛造材が開発され逐次採用されるようになった。1960 年代が鍛造材から鑄造材への転換期になつているが、この理由は鍛造材では材料の耐用温度の向上に必要な  $\gamma'$  析出相の増加に限界があつたためと前述のメタル温度を下げるための冷却翼の製作が鍛造材では至難であつたためと考えられる。 $\gamma'$  相は  $Ni_3(Al, X)$  でここで X は Ti, Nb, Ta などであるが、一般に Al, Ti, Nb, Ta の含有量が

多いほど  $\gamma'$  相は増加し Fig. 8 に示すように  $\gamma'$  相が多いほどクリープ破断応力が向上して耐用温度を高めることができる。鍛造可能な  $\gamma'$  量は体積率で 45% 付近が限界であり、鑄造材では  $\gamma'$  量をどんどん増加させることが可能で 60~65% まで高めることができる。このようにタービンプレード用超合金の発展の歴史はいかにして強化元素、 $\gamma'$  相を増加させることができるかが開発の主体であつた。しかしながら  $\gamma'$  量の増加はマイクロシリンケージの発生・延性の低下をもたらすためこれを解決しなければならなかつた。そこで結晶粒の微細化、次いで一方向凝固法による柱状晶化、さらに単結晶化が考えだされ、強度、靱性の向上を達成した。この一方向凝固や単結晶の製造法は鑄型の端面に冷却板を取り付け温度勾配と凝固速度をコントロールすることによつて端面から連続した柱状晶あるいは単結晶を作るもので優先凝固方位である最少すべり系方位 [001] がブレード負荷応力と一致するので強度的に有利である。さらに負荷

Table 8. Potential composite materials for aenoengine applications.

Class	Designation	Fiber	Matrix	Density g/cm <sup>3</sup>	Maximum Temperature °C	Characteristics
Fiber reinforced plastic composites	FRP	Glass Carbon Kevlar	Epoxy resin	1.5	120	High specific strength (S. S.) and ductility S. S. ~100 km
	Heat resistant FRP	Carbon	Polyimide resin	1.5	250	High temperature application
	Advanced H. R. FRP	Carbon		1.5~1.7	400	Further higher temperature application
Metal matrix composites	Al matrix MMC	SiC Carbon	Al alloys Heat resistant Al alloys	2.7	450	S. S. ~50 km
	Ti matrix MMC	SiC	Ti alloys	4	600	S. S. ~40 km
	Advanced MMC	SiC	High temperature Ti alloys intermetallic compound	3.4~4	800	S. S. ~25 km
Super high temperature composites	Fiber reinforced superalloys	Refractory metal	MCrAlY intermetallic compound refractory Alloys	8~12.5	1 200 1 400	Higher temperature than superalloys
	Fiber reinforced ceramics	SiC Carbon	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , SiC, Glass	2.5~3	1 500 1 800	S.S.~40 km toughened ceramics
	Carbon/Carbon composites	Carbon	Carbon	1.7~2	2 000	Ultra higher temperature application higher specific strength and ductility S.S.~40 km

応力に直交する結晶粒界がないため熱疲労にも強く耐用温度が向上する。今日タービンプレードに使用されているのは柱状晶合金に PWA 1422 と単結晶合金に PWA 1480 などがある。なお、単結晶合金には従来の多結晶合金と異なり C, B, Zr などの粒界強化元素は添加されておらず粒界溶解の問題がなくなるので 1300°C 前後の高い固溶化熱処理温度を採用することができるので  $\gamma'$  相の微細化が計られ、その結果クリープ破断強さの向上に寄与している。

さらに次世代耐熱金属材料として共晶合金や酸化物分散強化型合金の開発が進められている。

#### 5.1.2 複合材料の航空エンジンへの適用

航空エンジンの軽量化のためには比強度の高い材料が要求されるので、高強度の繊維によつて低密度のマトリックスを強化した繊維強化複合材料の開発が必要である。航空エンジン適用の対象となる複合材料を Table 8 に示す。これらの複合材料のうち、FRP はすでに広く工業材料として実用化されており、エンジンにもすでに適用が試みられている。例えば、比較的低温の部分であるファン、低圧圧縮機の動翼および静翼、アウターダクトなどに GFRP, CFRP が採用されてきた。さらに耐熱 FRP の適用および 370°C 以上を目標とした耐熱マトリックス樹脂の開発によつて、その利用が拡大されようとしている。

一方、FRM (Fiber Reinforced Metal), FRS (Fiber Reinforced Super-alloy), FRC (Fiber Reinforced Ceramics), C/C (Carbon-Carbon composite) などの

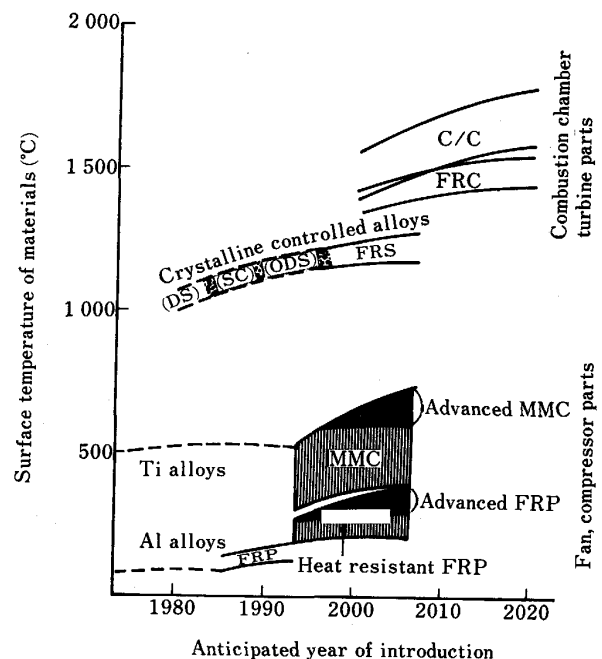


Fig. 9. Anticipated years of introduction of various advanced materials.

複合材料は FRP に比べて開発の歴史が浅く、航空エンジンへの適用はまだない。しかしエンジンの高性能化に伴い、今後これらの先進複合材料の研究開発に拍車がかかることは疑いもない。

#### 5.2 極超音速機用材料

現用の金属系材料よりはるかに高い耐熱温度を有する



FRS, FRC, C/C などの複合材料を燃焼器, タービンおよびエグゾーストなどの部分に使用することにより, 将来, タービン入口温度を現状の 1200~1400°C から 1700°C 以上に上げることが可能となり, エンジンの性能および燃料消費率が飛躍的に向上することが予想される。

同時に, 1990 年代, 2000 年代に向かつて開発が考えられている超音速機や極超音速機には機体材料の高温化が必要と共に, エンジンも今日までのジェットエンジンに加えて高速高効率のラムジェットを併用するスクラムジェットなど新しい超音速エンジンの開発とこれを支える高温材料の開発が大きな課題である。

Fig. 9 は航空エンジン用複合材料の実用化予測を示したものであるが, これらの超耐環境性先進材料の実用化がとくに要望されている。

## 6. ま と め

人間社会において, エネルギー問題, 輸送問題は今後

共, 永遠に欠くことのできないものである。またこれが世の中のニーズによつて種々と変化してくることは人間社会における文化, 科学の進歩変遷に負うところが多い。

エネルギーの多用化による技術開発, 省資源, 省人化のための機械, 装置の自動化, さらには安全性からくる機械装置の信頼性の向上などのため, 新素材, 新制御や故障診断システムの採用など高度技術をいかに取り入れるかが重要な課題である。

また近来さげばれている空間の利用は地下に, 海に, 宇宙へとその範囲が拡大されつつあり, いずれも高度重厚長大であり, 高精度, 高信頼性の重厚長大の発展であつて, 先端技術, 新素材が付加された夢多き重工業の進展と見る事ができる。

重工業 30 年のあゆみで示した重厚長大技術はこれが消滅するのではなく, むしろこれが一つのベースとなりさらに先端技術や新素材を取り込むことにより磨きのかかった高度精密重工業へと発達して行くものと信じて止まない。