

名誉会員からのメッセージ

研究生活50年

東京大学 名誉教授

藤田 利夫



1 はじめに

大学卒業以来50数年耐熱鋼の研究一筋に來られたのは、筆者にとって非常にラッキーであったと思う。先ず恩師芥川武先生のすばらしい御指導が得られ、さらに多くの方々の御支援・御協力のおかげで、現在9-12Cr耐熱鋼で世界の頂点にたつことができたものと感謝の気持ちで一杯である。

9-12Cr耐熱鋼は、現在軽水炉型原子力発電プラントに代る高効率(高温高圧化)火力発電プラントに必要な欠くべからざる重要な材料として欧州で大規模な共同研究(COST 501,522)が過去20年行われてきたが、まだ満足できるものは開発されていない。筆者らが20年前に開発したASME P92 (TB9, NF616) が最もすぐれたものとして実用化されているのが現状である。

そこで、後輩諸君の研究に少しでも役立つことができればと考え、筆者の研究経過を回想してまとめたものである。

2 研究生活50年における研究テーマ

(1) クリープ試験機の開発

昭和26年大学を卒業して大学院に進学したとき、恩師芥川先生から耐熱鋼の研究を行うように言われた。

耐熱鋼の研究を行うには先ずクリープ試験機を試作しなければならなかった。当時住友金属で5台のクリープ試験機を手製で作り、1000時間のクリープ試験を行うのがやつの時代であった。しかも自動温度調節器の精度も悪く、熱電式の機械的自動温度調節器(水銀スイッチのon/off)を使用していた。

そこで先ず高感度の自動温度調節器を電気工学科の先生方の応援を仰ぎ昭和27年10月に完成した。従来 $\pm 3 \sim 4^{\circ}\text{C}$ 程度の温度調節精度であったものを $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ まで向上させ、当時の英国(BS)・米国(ASTM)のクリープ試験規格を十分満足するものを得ることができた。クリープ伸びも望遠顕微鏡方式を採用し、試験片の伸びを $1\mu\text{m}$ まで精度よく測定できるようにした。

この試験機は外国製(スイスのAmsler社)のものにくらべ精度もよく、価格も1/10であったため、広く国内で使用され我が国のクリープ研究に大きな貢献をすることができた。

(2) TAF鋼の発見と開発研究

昭和27年からフェライト系12Cr耐熱鋼を研究し始めたが、当時高周波溶解炉が良くなかったため、目標のC量にすることが非常に困難で、C量の違った試料ができたので、それらの試料のクリープ試験を行うと、クリープ強度が非常に異なった。Cがこのようにクリープ強度に大きい影響をおよぼすならB、Nも大きい影響があると考え、B、Nの影響を詳細に研究して、すぐれた12Cr系耐熱鋼・TAF鋼を発見した。若し現在のようにすぐれた高周波真空誘導溶解炉があったら、C、B、Nに着目することなく、TAF鋼の発見は10～20年遅れたかも知れない。このTAF鋼は発見以来50年たっているが、現在でも600～650℃の長時間クリープ破断強度は世界最高である。

またこの鋼は靱性が低いにもかかわらず、昭和35～36年頃の三菱重工業の強力な実用化研究により、ロータ、ボルト、動翼材として約1万トン使用された。現在では世界の何処の会社も実力をなくしているので、恐らく実用化はできなかっただろうと考える。

(3) マグネシウム製錬用レトルトの研究

ドロマイトとFeSiを混合して真空中で1200℃に加熱すると、ドロマイト中のMgがFeSiで還元されて金属Mgが得られるが、このとき使用されるレトルトは1200℃に長時間(120～300日)加熱される。それに使用される材料は0.4C-28Cr-15Ni系ステンレス鋳鋼であったが、その寿命を長くするための研究を昭和35年頃に行った。

そのため1200℃でクリープ破断試験ができる試験機を作り、レトルトの寿命と1200℃のクリープ破断強度の関係を求めると1200℃のクリープ破断強度(100～300h)の高いレトルトは寿命が長いため、クリープ破断強度を高める研究を行った。

0.4C-28Cr-15Ni系ステンレス鋳鋼に合金元素(Mo, W, Nb, B, Coなど)を添加してクリープ破断試験を行ったが、

1200℃ではあまり効果のある元素は発見できなかった。しかしレトルトの寿命は製造のときの原料中の不純物（N，低融点金属など）が大きく影響していることがわかり、それらに注意して製造するようになり寿命を長くすることができた。

このように超高温でステンレス鋳鋼を使用するときは微量元素及び製造条件が寿命を左右するものである。

(4) Tempaloy鋼の開発

昭和40年頃、日本鋼管が日本金属工業の支援のもとでステンレス鋼の製造を始めたとき、304 ステンレス鋼を作り、日金工の304 ステンレス鋼の製品とクリープ破断強度の比較を行ったが、日金工の製品が数段すぐれていた。分析値もほぼ同じで、理由がよくわからなかったので、何故このように違うのかと筆者に質問され、筆者は恐らく日金工の製品にはTi，Nbが微量あるためと答えた。早速分析すると、0.02～0.03%Ti，Nbを含有していることがわかった。日本鋼管では、このような微量のTi，Nbではあまり高温強度に影響しないと考えたが、再現性の試験を行ったところ、日金工と同等の高温強度が得られた。そこで、日本鋼管は304 ステンレス鋼にTi，Nbを少量添加し、さらに最適のC量を求めて現在のTempaloy A1鋼を開発した（表1）。このTempaloy A1鋼は経済性にすぐれ、しかも高温強度が良いため、広く使用されている。このように筆者がピントの合ったコメントが言えたのは、304鋼の高温強度におよぼすTi，Nbの影響について研究していたからである。

これから考えて、321、347 ステンレス鋼を高温で使用するときは、改良する必要がある（表2）。

現用のステンレス鋼は、(Ti，Nb) (C，N) が使用初期に析出するのみであるが、長時間使用中でもM₂₃C₆、M₂Nなどを析出させて強化する必要があると考える（表3）。

このようにすれば、347、321 ステンレス鋼の長時間強度

を1.5～2倍程度に向上させることができる。

現在世界的に鉄鋼の研究開発力がなくなったので、このような研究は30～40年行われていない。

(5) スイスのEscher Wyss研究所

昭和39年欧州の耐熱鋼の研究状況を調査に行ったとき、当時日本全体でクリープ破断試験機は300台程度しかなかったが、Escher Wyssの研究所では同時に1900本のクリープ破断試験ができる試験機を設置し、日本では数千時間のクリープ破断試験をやっと行っている程度であったが、Escher Wyssでは数万～20万時間の試験を行っていた。これらの試験機は全部手製で200～300 m²の小さな実験室に設置されていた。筆者がすばらしい設備だと感心したら、今までに多くの研究者が見学に来たが、誉めたのは世界であなたが3人目だと言って、筆者の実力をたたえてくれた。

現在この試験機を改良したものが日本鋼管、川崎製鉄（現JFE）、新日鉄、三菱重工業などに設置され、日本が世界の60%（12000本）のクリープ破断試験ポイント数を有する国になることができた。研究には自分で新しい装置を作り、画期的な成果をあげることが大切である。

(6) 英国のJessop Saville研究所

昭和39年に欧州に行き、Sheffield郊外のJessop Savilleの基礎研究所を訪問したことがある。この研究所は耐熱鋼、工具鋼などの研究では当時世界で最もすぐれた研究を行っていたので、さぞ立派な研究所であると思って行ったが、意外に小さく、汚い研究所であったのに驚いた。しかし研究所長以下20数名の研究者は必死で研究を行っていたので深い感銘を受けた。このような努力が当時のJessop Savilleの研究成果につながったものとする。昔から“研究は人なり”と言われているが正にその通りで、すばらしい人がすばらしい努力をしたときに画期的な成果が生れるものと思う。

(7) 自動車エンジン用プレチャンバーの開発

昭和41年頃いすゞ自動車とジーゼルエンジン用プレチャンバーの共研を行ったことがある。当時は名神・東名高速道路が開通し、自動車エンジンが酷使されプレチャンバーがよく故障していた。材料は0.4C-28Cr-13Ni系ステンレス鋳鋼が使用されていたがこれに合金元素（Mo，W，Nb，B，Coなど）を加えて改良研究を行い、2年がかりで0.4C-28Cr-12Ni-10～25Co-3Mo-2W-0.5Nb系鋳鋼を開発し、性能試験も非常にすぐれて実用化しようとしたとき、エンジンの形式が直噴式に変化し残念ながら旧式のエンジンの補修用にしか使用されなかった。自動車用部品の開発は3～6ヶ月程度の短期間でないと、いくら良い製品を開発してもあまり意味がないことがわかった。

表1 Tempaloy A1鋼の化学成分

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Nb	Ti
Tempaloy A1	0.12	0.6	1.5	10	18	0.1	0.08

表2 Tempaloy A1鋼，304および347 ステンレス鋼の高温強度

	許容応力 (MPa)		
	650℃	700℃	750℃
Tempaloy A1	57	38	24
304	38	22	12
347	42	24	16

表3 ステンレス鋼の炭窒化物

	初期使用中	長時間使用中
現用ステンレス鋼	(Ti,Nb) (C,N)	—
改良ステンレス鋼	(Ti,Nb) (C,N)	M ₂₃ C ₆ , M ₂ N

(8) NF616 (ASME P92) の開発

平成2年から平成15年にかけて、筆者が東京大学で開発したTB9、TB12鋼の実用化研究が米国電力研究所 (EPRI) の主催で日・欧・米で共同研究が行われた。TB9鋼は新日鉄 (NF616)、TB12鋼は住友金属 (HCM12A: TB12+Cu)、Forgemaster (英) (TB12 M: TB12+Ni) で鋼の製造を担当し、三菱重工業、ABB-Combustion Engineering, Rolls-Royce, EPRI, ELSAM, National Power, Skelton Imperial College, Technical Univ. of Denmarkなどで基礎および実用化研究が行われた。

これらの研究は日・欧・米の3地域で各々6回計18回の研究打合せ会を行い、NF616, HCM12A鋼はASME規格に採用され、ASME P92 (NF616), ASME P122 (HCM12A) として世界で広く実用化されている。

筆者が東京大学で開発したときは、TB9鋼の600℃、 10^5 hクリープ破断強度は160~180 MPaであったが、実用化されたASME規格では132 MPaしか認められなかった。これは大学で使用したものが真空溶解材で、不純物も少なくAl, Niなどの含有量も少なかったことのほか、 δ フェライトをなくするためC量を増加したために強度低下をおこしたものと考える。鉄鋼材料は原料、溶解法、加工プロセス、熱処理などによりLab.dataは実用化されるとき20~30%強度低下をすることがあると考えられるから、化学成分だけでなく製造プロセスをよく検討して製品を作ることが必要である。

(9) TMK1 ロータ鋼の開発

昭和58年末頃、三菱重工業から12Crロータの開発研究を依頼されたことがあった。このとき三菱重工業は566℃まで使用できる12Crロータしか持っていなかったが、すでに日立、東芝は593℃で使用できる12Crロータを持っていたので、この3ヶ月で日立、東芝と同等の12Crロータを開発する必要にせまられていた。

このとき、当時の飯田副社長の強力な御要望と、機械科出身の熱心な一人の研究者により、3ヶ月で他社が10年程度かかった開発研究を完成し、TMK1鋼として現在までに数本タービンロータを作り、593℃で実用化している。欧米でも同様にTMK1鋼が実用化されている。

この3ヶ月間の彼の超人的な努力により完成できたと思う。勿論筆者も除夜の鐘を聞きながら大学で実験を行った。夕方、東大の実験室で得られるその日のdataを調べるため大学に来ると同時に筆者といろいろ討論をし、夜本社に帰って、8時頃共同研究をやっていた神戸製鋼に電話でその日のdataを聞き、また、夜10時ごろ長崎研究所に電話をしてその日のdataを調べ、夜中に3者のdataを整理して、早朝6時にはそれらのdataを筆者のうちの郵便受けに入れ、筆者がそのdataを見てその日の研究方針をたてることを毎日行っ

た。この努力により、欧米が驚くようなすばらしい12Crロータが3ヶ月で開発できたと考える。

(10) HR1200 ロータ鋼の開発

昭和62年大学定年後日立製作所で12Crロータ鋼の開発研究を行い、平成2年HR1200鋼を開発した。この12Crロータ鋼は650℃の蒸気条件でも使用できる高温強度・靱性のすぐれたものである。国内外でもこの12Crロータ鋼をmodifyして多くのロータ鋼を作っている。この鋼は高Wにより高強度が必要な600℃付近の 10^5 hクリープ破断強度を高め、650℃の高強度化のため従来ロータ鋼より低C化したもので、 δ フェライトが生成しやすくなるのをCoでおさえた従来のロータ鋼とは全く異なった画期的なものとして国内外から注目されている。

(11) 自動車用排気ガス用鋳鋼の開発

平成2年頃から排気ガス用鋳鋼の開発研究を日立金属素材研と行った。

最初はフェライト系の18Cr鋳鋼であったが、ガス温度が上昇したため、オーステナイト系の0.4C-28Cr-15Ni鋼の研究にはいり、使用温度が900~1000℃であったためW, Nbなどを添加して、従来のものより数段寿命の長いものを開発できた。この程度の温度では、これらの元素で強度を高め、寿命のすぐれたものが開発できるが、さらに高温化するときにはC, N, W, Nbなどの添加量を最適にする必要がある。若し1050℃のガス温度で使用するときは1050~1100℃の100hクリープ破断強度を高める合金元素量にすれば良いと考える。

(12) 日立研究所の単結晶動翼の研究

数年前の年末、日立研究所の見学をする機会があったとき、たまたま単結晶動翼の研究を行っているグループに筆者が「この年末年始3人の研究者が皆休むようだ、10年たってもガスタービン動翼 (全長30 cm) の単結晶化は困難だろう」と言ったら、そのうちの一人が寮にも帰らずに研究室で寝起きして研究をやるようになり、2年後欧米でも成功しなかったガスタービン動翼の単結晶化に成功した。すばらしい努力をしないと画期的な研究成果は得られない。

(13) 中国の鉄鋼業

中国の鉄鋼業は現在長足の進歩をとげている。平成14年度の鉄鋼の生産量は2億トンに達し、毎年新日鉄の生産量に匹敵する量が増加すると言われている。一方中国の鉄鋼研究者は昭和30年代の日本のように寝袋で寝ながら、研究を進めていると聞く。

筆者が昭和39年、英国のSheffield大学で先生方と話し合ったことがある。そのとき東大の工学部の学生のどの程度の学力の学生が鉄鋼会社に行っているかと聞かれたので、金属は上位、機械、電気は中位と言いましたら、英国は全部ビリ

の学生しか鉄鋼会社に行かないと言われ、あと10年すれば、英国は鉄鋼生産において日本に負けるだろうと言われたが、はたして10年後は、日本は1億トン、英国は国営になり2000万トンであった。現在これと同じことが中国と日本の間で起きていると考えられる。現在中国の鉄鋼業には世界で最も優秀な学生が投入されているから技術力で日本が中国に負ける時代が必ず来るだろうと考えられるから、今より鉄鋼研究者、技術者は一段と努力する必要があると考える。

(14) 高速増殖炉の構造材料

現在高速増殖炉の構造材料はオーステナイト系304および316ステンレス鋼が使用されているが、熱疲労に弱いため、これに比較的強く物量削減が可能なフェライト系9-12Cr耐熱鋼に置換する研究が核燃料サイクル機構において行われている。フェライト系9-12Cr鋼は熱疲労には強いが、溶接性および耐食性がオーステナイト鋼に比較して悪く、また長時間使用すると脆化する可能性が高いため、これらに重点を置いて研究が行われている。また炉の寿命としては50年以上を期待し、温度は燃料被覆管温度の制約があり550℃におさえている。

今後、熱疲労に強いオーステナイト系ステンレス合金が必要になると考えられるが、筆者は表4のような合金成分を考えている。

S1はW量を多くして熱膨張係数をできるだけ低くし、 σ 相の析出を防止しさらに熱膨張係数も低くするためNiを35%にした。Tiを添加して、Ni₃Tiを析出させて耐力(引張強さ)を高めた。

S2、S3はS1よりさらに低熱膨張係数をねらった合金である。S2は原料にFerroCr, FerroWを使用できるようにしたものである。

(15) ボイラ鋼 (ASME P92) の改良研究

数年前からパブコック日立とボイラ鋼ASME P92鋼の改良研究を行っている。この鋼は微量のAl, Niなどにより600~650℃の長時間強度が低下するため、これらの元素をできるだけ低くし、C, N量を最適成分にしたもので650℃

表4 熱疲労に強いオーステナイト系ステンレス合金の化学成分

	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Ti	Al	N	Fe	熱処理		
S1	<0.05	0.5	1.5	15	35	10	2.5	0.2	<0.05	35	1000℃	W.Q.	750℃ A.C.
S2	<0.05	0.5	1.0	15	50	20	0.2	1.5	<0.05	12	1050℃	W.Q.	750℃ A.C.
S3	<0.05	0.5	1.0	15	62	20	0.2	1.5	<0.05	—	1050℃	W.Q.	750℃ A.C.

長時間強度を求めているが、従来1万~3万時間付近で急激に強度低下したものが逆S字型を示し、クリープ現象をおこさなくなった。世界が絶望視していた650℃用の9Cr系ボイラ鋼の開発ができる可能性が非常に高まったものとする。

このように9-12Cr耐熱鋼は微量の有害元素により長時間クリープ破断強度が低下するので十分注意しながら開発する必要がある。

しかしこの鋼が10~20万時間使用しても十分な靱性値が確保できるかは長時間クリープ破断試験および加熱試験を行わなければならない。

3 おわりに

以上のようにいろいろの開発研究を50年やって多くの画期的な耐熱鋼を開発することができたのは、研究分野を耐熱鋼1本にしぼって研究してきたのが良かったと思う。

すばらしい研究成果はすばらしい実力のある研究者が多くの実験中に偶然発見するものとする。実力のない研究者はいくらすぐれた実験結果に出会っていても新しいことを発見することはできないものとする。ニュートンは林檎の落下するのを見て万有引力を発見したが、実力のないものはいくら林檎の落下現象を見ても何も新しいことを発見することはできないのと同じである。従って実力をつけるためには日夜をわかつた一生懸命研究実験を行うことが必要だと思う。

これからの若い研究者は研究分野をできるだけ変えないで、同じ研究を必死で50年自分自身で実験を行えば筆者を凌駕する研究成果をあげ、世界の科学技術に著しい貢献ができるものとする。

(2003年12月22日受付)