No.415 2026.4.6

京機短信

KEIKI short letter

京機会（京都大学機械系同窓会）　tel. & fax. 075-383-3713
E-Mail: jimukyoku@keikikai.jp
URL: https://keikikai.jp
編集責任者　京機短信編集委員会

目次

・2025年度「卒業証書・学位授与式」……土屋智由（pp. 2-3）
・超高温蒸気タービンの思い出（前編）……藤川卓爾（pp. 4-15）
・「韓国の歴史を辿る旅」の同窓会……藤川卓爾（pp. 16-17）

2026年3月23日（月）12時～　卒業証書授与式（吉田・物理系校舎313講義室）

2026年3月23日（月）17時～　修士課程学位授与式　（桂C3棟講義室1）

2025年度「卒業証書・学位授与式」および「修了記念パーティー」

土屋智由（H3/1991卒）

物理工学科機械システム学コースの卒業証書授与式ならびに機械理工学専攻・マイクロエンジニアリング専攻修士課程の学位授与式が3月23日に開催されました。

修士学位授与式後の18時からは、京機会主催の「修了記念パーティー」がカフェテリア「cenatio silva」で開催されました。土屋専攻長・代表幹事の挨拶と乾杯でスタートし、最後は今月末で退職される松原厚教授の温かいメッセージで締めくくられました。近年はコロナ禍で中止や縮小をすることも多かったパーティーも今年は沢山の学生・教員の参加で大いに盛り上がりました。

超高温蒸気タービンの思い出（前編）*
Memories of Very High Temperature Steam Turbine – Part 1

藤川卓爾（S42/1967卒）

転載元：火力原子力発電技術協会、
「火力原子力発電」、Vol.77、No.833、
pp.11‐34，(2026-3)

１．はじめに

筆者は40年余り前に、超高温蒸気タービンの開発に携わって、それまで566℃に留まっていた火力発電プラントの蒸気温度向上による効率向上を図った。開発の第二段階のSTEPⅡでは世界最高温度の649℃での実証運転が達成された。その時の思い出を記す。

２．開発の背景

2.1 日本の電力開発の歴史[1)]

先ず、日本の電力開発の歴史を振り返る。図1に日本のエネルギー供給量の推移を示す。これは発電だけではなく、産業、運輸、民生すべてに使用されるエネルギーである。戦前は石炭がエネルギー資源の大半を占めていた。蒸気機関車に代表されるように鉄道の部門でも石炭が動力源となっていた。20世紀に入って、自動車と航空機の利用が始まると石油の使用が始まったが、火力発電の燃料としては依然として石炭が使用された。国内の電力会社は水力電源の開発と長距離送電線による消費地への供給に力を入れていた。電力の分野では「水主火従」の時代であった[2)]。

戦後、復興を支える原動力として電源の開発が行われた。戦後の電源開発の最初はやはり「水主火従」であった。関西電力（株）の丸山ダムや電源開発（株）の佐久間ダムなど、筆者の少年時代の記憶に残っている。その時代の終盤を飾るのが「黒部の太陽」で有名な関西電力（株）の黒部川第四発電所の建設であった。

---

* 短信編集委員会より：火力原子力技術協会より、同協会刊行の「火力原子力発電」から転載が許可されています。今月号では前半を掲載させていただきます。

続いて、火力の開発が活発化した。先ず、国内の産炭地で発電する産炭地火力が建設された。やがて、取り扱いに便利な液体燃料である石油が火力発電にも使用され始める。1バーレル（約160リットル）2ドルという安い値段で手に入るのだからそれを使わない手はない。高度経済成長期の後半を迎えて輸入石油火力全盛の時代が到来した。図1のエネルギー供給量の急上昇はこの時期の石油輸入量の急上昇によるものである。それまでに建設された石炭火力でこの時期に石油焚きに転換されたものもある。この頃から火力発電の総容量が水力発電の総容量を上回って「水主火従」から「火主水従」に転換した。

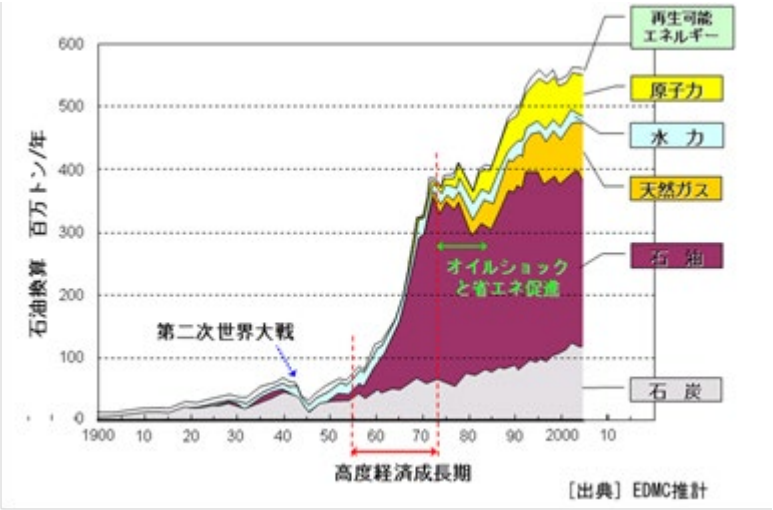


図1　日本のエネルギー供給量の推移

1970年代に、2度にわたってオイルショックが発生した。最初は1973年、2度目は1979年である。2度のオイルショックで1バーレル2ドルだった原油価格は30ドルまで値上がりした。価格上昇とともに供給量の不安もあって、火力発電の燃料をいつまでも石油に頼っていてよいのかという疑問が当然のように起こり再び石炭火力が注目された。しかし、採掘の手間がかかり人件費も高い国内炭を使用したのでは経済性が低くなる。そこで登場したのが安価な海外炭を使用する輸入炭火力である。電源開発（株）の松島火力を始めとして大容量の輸入炭火力が建設された。

2.2 1980年代以降の電力開発の流れ

1980年代に入って、二つの動きが生じた。一つは、蒸気条件向上による石炭火力の効率向上である。もう一つは、天然ガスを燃料として、ガスタービンを使用する複合発電プラントである。

発電システムの効率向上の手段としては、熱力学的には作動流体の最高温度を上げることと、最低温度を下げることが有効である。ガスタービンとその排ガスの熱回収ボイラと蒸気タービンを組み合わせた複合発電プラントは、ガスタービンを用いることによって通常のランキンサイクルの蒸気発電プラントに較べて、作動流体の最高温度を飛躍的に高めることができるので高効率が達成できる。しかしながら複合発電プラントの燃料に適した天然ガスは石油と同じように埋蔵量が有限である。一方、埋蔵量が豊富な石炭はそのままではガスタービンの燃料に適さないので、これを可能にするための石炭ガス化複合発電システムが構想されたが、1980年代時点ではその実用化にはまだしばらく時間を要するというのが実情であった。

そこで従来の石炭焚き火力発電プラントの蒸気条件を向上して効率を高めることが早期に実現可能な技術として重要になった。

2.3 火力発電プラントの蒸気条件と最大出力の変遷[3)、4)]

1902年の米国での最初の事業用火力発電プラントの蒸気条件は、主蒸気圧力1.2MPa（160psig)、主蒸気温度177℃（350°F)、出力は2MWであった。それから1959年の米国Eddystone 1号機の主蒸気圧力34.6MPa（5000psig)、主蒸気/一段再熱/二段再熱温度649/593/593℃（1200/1100/1100°F)、出力325MWまで火力発電プラントの蒸気条件は最大ユニット出力とともに段階を経つつ大きく見ればほぼ直線的に増加した。この様子を図2から図4に示す。

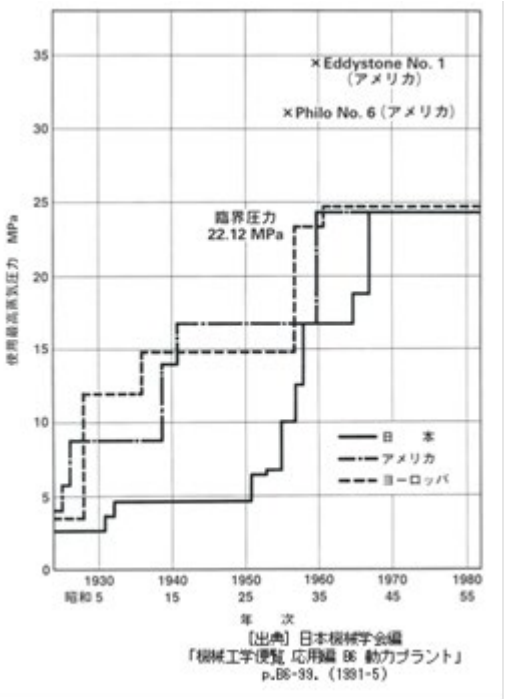


図2　火力発電プラントの主蒸気圧力の変遷

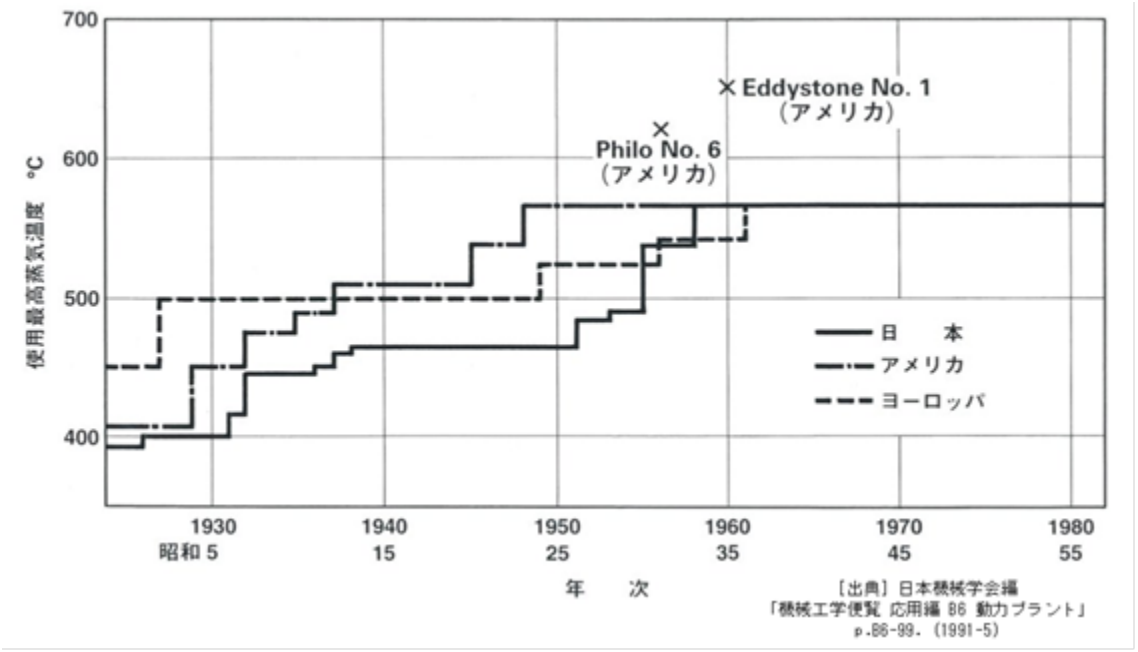


図3　火力発電プラントの蒸気温度の変遷

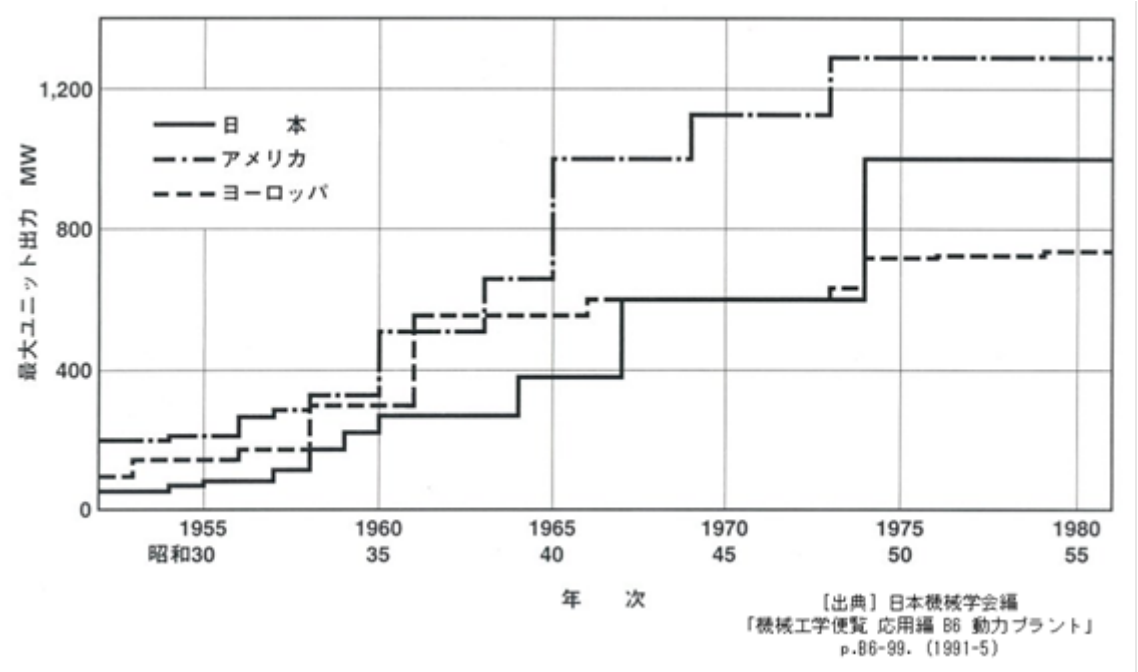


図4　火力発電プラントユニット出力の変遷

最大ユニット出力はその後も1300MWまで増大したが、蒸気条件は1960年以降頭打ちとなりEddystone 1号機から一歩後退して24.2MPa（3500psig）、566℃（1050°F）に留まるという状態が1980年代まで続いた。

1960年以降の火力蒸気条件停滞の背景は、（1）ベースロードとしての原子力発電の増加と、（2）安い化石燃料価格であった。この蒸気条件停滞はランキンサイ

クル史上最長の停滞であったが､2.2項に述べたように1980年以降日本においてこれを打破しようという動きが、石炭火力超々臨界圧（Ultra Super Critical pressureの頭文字をとってUSC）化への挑戦として始まった。

この背景は、

（1）原子力発電所の建設が以前より困難になったこと

（2）新規火力発電所の燃料として石油の使用が世界的に禁止され、石炭価格がいつまでも安価に留まる保証がないこと

（3）地球温暖化防止のためにも効率向上すべきこと

（4）石炭ガス化の実用化がかなり遅れそうなこと

であった。

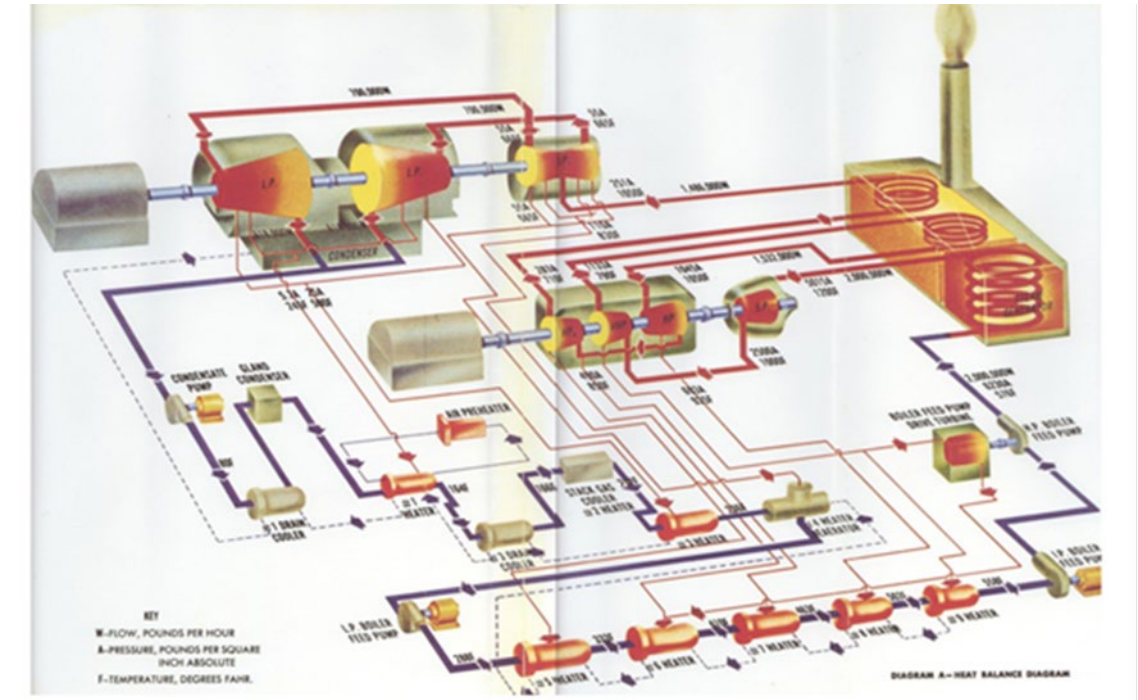
このうち、（4）は1980年当時の事情であり、現在では石炭ガス化複合発電プラントが既に実用化されている。

2.4 Eddystone 1号タービン[3)]

米国のPhiladelphia Electric Co. Ltd.のEddystone発電所1号機は1959年に運転開始した当時の最高蒸気条件の最大容量機であった。

プラント全体の系統図を図5に示す。右上にボイラが描かれているが、二段再熱プラントであるので、過熱器と二つの再熱器が描かれている。タービンはクロスコンパウンド型である。プライマリー軸は3,600rpmのSP（スーパープレッシャー）タービンとVHP（超高圧）-HP（高圧）-HP2（高圧第二）タービン、セカンダリー軸は1,800rpmのIP（中圧）タービンとLP1（低圧第一）タービン、LP2（低圧第二）タービンからなっている。

給水加熱器は低圧3段（うち１段はタービンからの抽気ではなく煙突からのガスで給水を加熱）と脱気器、高圧5段の合計9段である。ボイラ給水ポンプは脱気器出口に電動給水ポンプが配置されているのに加えて、高圧給水加熱器出口に電動と蒸気タービン動の2段階が直列に配置されている。通常のプラントでは給水ポンプは脱気器出口に配置されているだけであるが、このプラントでは主蒸気圧力が最終給水温度の飽和圧力より相当に高いので、高圧給水加熱器の給水側設計圧力を低めるためにこのような工夫をしたものと思われる。



【出典】C.B.Campbell,C.C.Franck,Sr.,J.C.Spahr, "The Eddystone Superpressure Unit" ,ASME paper no.56-A-156, (1956-11)

図5　Eddystone 1号プラント系統図

従来の蒸気条件を大幅に超えるため、タービンには数々の新材料、新設計が盛り込まれた。その一例がSPタービンである。当時は、主蒸気温度649℃に耐える大きなロータ材料を製造する技術がなかったため、超高温部をSPとして独立させて小さなタービンエレメントとした。SPタービンの外観図を図6に示す。高温強度が高いオーステナイト鋼の主蒸気入口管は熱膨張係数が大きいので熱応力を緩和するために大きなループを描いている。SPタービンの断面図を図7に示す。図7では、超高温、超高圧の蒸気条件に対して次のような工夫が見られる。

（1）内圧応力の低減：外車室、内車室、ノズル室の3重構造にして各々の圧力容器の内外圧力差を低減している。また、外車室をできるだけ球形に近付けて内圧応力の低減を図っている。

（2）伸び差、熱応力の低減：熱膨張係数の大きなオーステナイト鋼の主蒸気入口管とフェライト鋼の外車室の温度、熱膨張係数の差による熱応力を低減するために、中間の熱膨張係数を有する材料を介した異材継ぎ手を適用している。この構造は後で述べる若松超高温タービンでも採用された。

（3）蒸気漏洩損失の低減：超高圧、高密度の蒸気は単位隙間面積当りの漏洩量が多くなる。ダミー環や外車室のグランド環にはクリスマスツリー型の断面を有する複雑なラビリンスを適用して漏洩蒸気量を最小限にしている。この構造には

高効率にかけるエンジニアの執念を感じる。今から70年近く前にこのようなタービンを作ったのはさすがに米国だと思う。

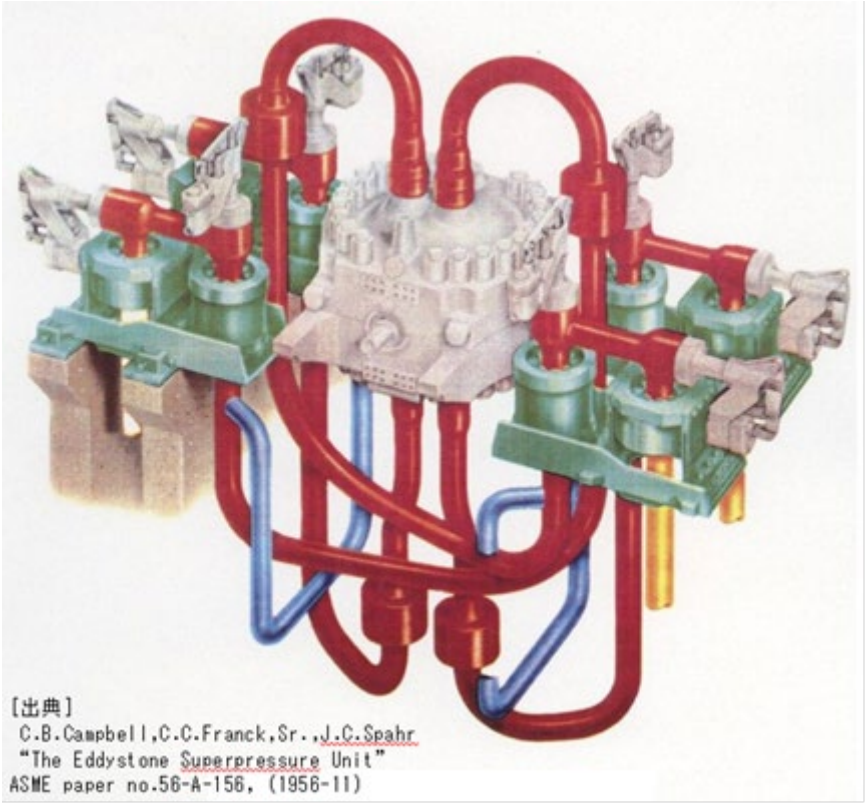


図6　Eddystone 1号SPタービン外観図

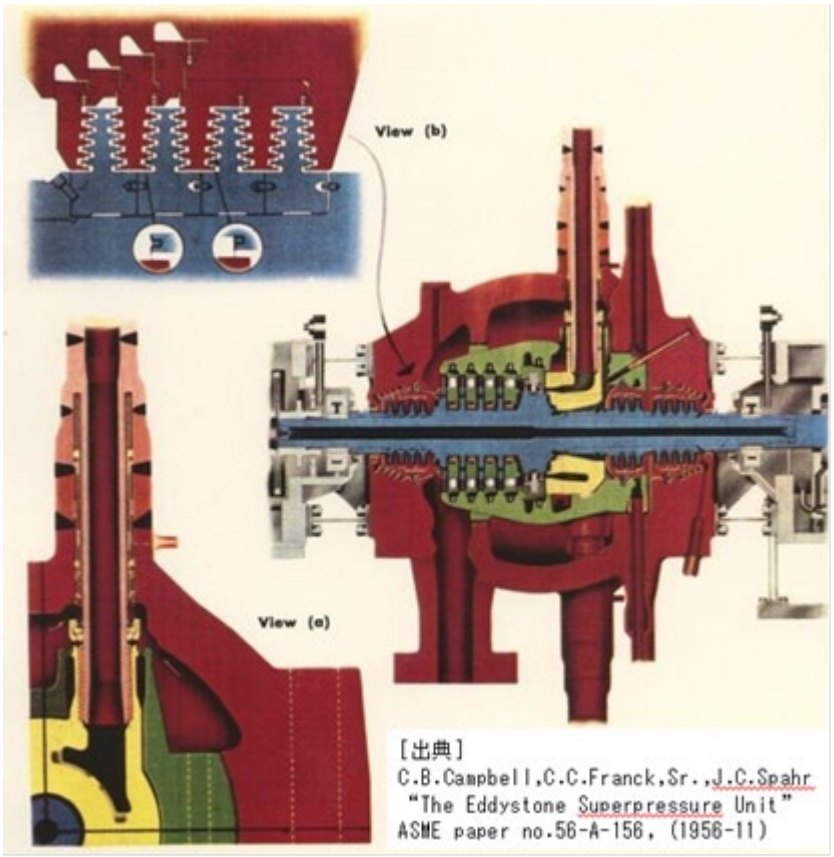


図 7　Eddystone 1 号 SP タービン断面図

Eddystone 1号機は運転開始後に配管のクラックやロータの振動などの問題が発生し、主蒸気条件を32.4MPa（4700psig)、607℃（1125°F）に下げなければならなかった。当時はこの蒸気条件の発電設備に対して、高い信頼性を満たしうる材料や加工技術がまだ十分に整っていなかったと言える。

３．開発の経過

3.1 開発の始まり[4)]

電源開発（株）では第一次オイルショックの後、将来長期的安定的に資源調達できるものは輸入炭であるとして大容量輸入炭焚き火力の松島発電所を建設した。資源輸入国の日本としてはさらなる効率向上によって経済性向上と環境影響低減をすることが必要であった。石炭火力高効率化の本命はIGCC（石炭ガス化複合発電）であるが、当時の技術ではIGCCを開発実用化するにはまだ時間を要するという状況であった。一方、従来の蒸気プラントの蒸気条件を向上して効率向上を図るUSCは早期に実用可能と考えられた。

昭和55年（1980）に電源開発（株）から、国内重電3社に次の諮問があった。

（1)1992年頃建設開始の微粉炭焚き火力の蒸気条件をどこまで上げられるか。

（2）その実証試験内容はどのようであるべきか。

この諮問を受けた時のことを、筆者より一回り上の先輩は次のように回顧している。

「1959年Eddystone 1の運転開始当時、タービンの設計・製造を担当したWestinghouse Electric社の設計室でアメリカ技術者達の緊張感と歓声を見聞して以来、何時の日か蒸気条件停滞打破の先陣を燃料輸入国の日本こそ切るべきである、自分もそれに携わりたいと念願していたので、遂にその日が来たという静かな感慨を持ったことを今もまざまざと憶えている。」

3.2 蒸気条件の設定

目指すべき蒸気条件は､20年前のEddystone 1号のオリジナル蒸気条件である。Eddystone 1号は運転開始後に発生した諸問題のために蒸気条件を下げて運転せざるを得なかったが、その後20年余りの間に進歩した材料や工作技術を適用すれば問題は解決できると考えられた。

USCタービン開発開始時点では649℃の高温に耐えるオーステナイトロータが製造できるかどうか分からなかった。蒸気タービンの高温部品には通常は12Cr鋼な

どのフェライト系材料が使用される。より高温強度を要する部品にはオーステナイト系材料が用いられるが、オーステナイト系材料は偏析が生じやすく加工に大きな力が必要なので大型部品を製作するのが難しかった。

そこで、いきなり649℃を狙うのではなく、計画を二段階に分けて開発を進めるという方策が採用された。

第一段階は31.0MPa（4500psig）、593/593/593℃（1100/1100/1100°F）で、この温度ならタービンの主要部品をすべてフェライト系材料で構成可能である。これを基本蒸気条件（その1）とした。

第二段階は34.5MPa（5000psig）、649/593/593℃（1200/1100/1100°F）で、ロータや内車室にはオーステナイト系材料を使用する必要があった。これを基本蒸気条件（その2）とした。

第一段階として先ず従来技術の延長線上にあるフェライト系材料で対応可能な蒸気温度593℃（1100°F）の超高温タービンを開発し、実証試験を実施する間に、第二段階の649℃（1200°F）用オーステナイトロータを開発する戦略とした。後から振り返ると、このように二つの段階に分けたことが開発を成功させた大きな要因であったと思う。

蒸気条件の向上によって効率が向上することは熱力学的に導き出せる。その様子を図8に示す。従来の24.2MPa（3500psig）、538/566℃（1000/1050°F）の超臨界圧プラントに較べて、第一段階の蒸気条件では相対値で約5%、第二段階の蒸気条件では相対値で約7%向上する。

3.3 大容量USCタービンの概念設計[5)]

次に1000MW級USCタービンの概念設計が実施された。これによって、必要な仕様（主要部材の大きさ、使用温度とその温度における材料強度）が明確にされた。基本蒸気条件（その2）の1000MW級USCタービンに対して図9に示す2つの形式が考えられた。（b）はEddystone 1号機と同様に、（a）のVHP（超高圧）エレメントの中の最高温高圧部分をSPエレメントとして独立させ､残りの部分をHPとのコンバインドエレメントとするものであり、性能上蒸気の漏洩損失が増加するため（a）より若干不利である。完成重量11tのオーステナイトロータが製造可能であれば（a）の形式が採用可能となる。

3.4 材料・構造の開発と高温タービン要素試験とUSCタービン実証試験

次に、上記の仕様を満足する材料の開発と、USCタービンに適した構造の開発

がなされた。続いて、USCタービンの静止部品を模擬したモデルに高温高圧蒸気を流す高温タービン要素試験が実施された。（1）異材接手を持つインレットスリーブ、（2）内車室、（3）蒸気室のモデルを用いた試験が実施され、色々な成果が得られた。特筆すべきものは内車室の変形である。12Cr鋳鋼内車室では内外面温度差に対する許容度が大きかったが、オーステナイト鍛鋼内車室（SUSF316H）では内外面温度差に対する許容値が小さいことが分かった。オーステナイト鋼は高温クリープ強度が高いが、降伏応力が低いため、大きな温度差がつくと熱応力によって降伏し、使用後に解放した時の内車室フランジ面の面開きが大きくなることが分かった。

さらに1000MW級USCタービンのSPタービンやVHPタービンを模擬したタービンを製作して実際に運転するUSCタービン実証試験が実施された。

写真1に電源開発（株）高砂火力発電所で実施された高温タービン回転試験に使用されたSPを模擬したタービン、写真2に電源開発（株）若松石炭利用技術試験所で実施された超高温タービン実証試験に使用されたVHPを模擬したタービンを示す。これらのタービンは大容量USCプラントに対して設定した二つの基本条件に対応して二つのSTEPに分けて、STEPⅠは主蒸気温度593℃，STEPⅡは主蒸気温度649℃で試験された。

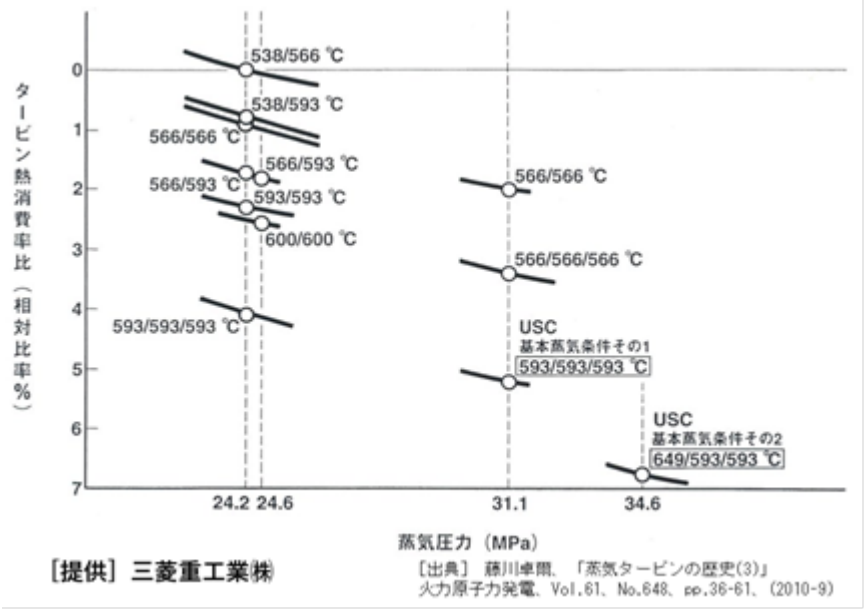
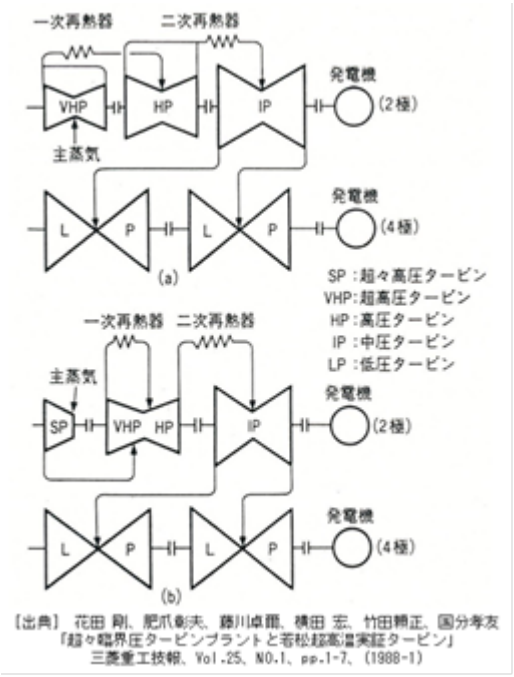


図 8　発電プラントの蒸気条件と効率



［出典］ 花田 剛、肥爪剛夫、藤川卓爾、横田 宏、竹田精正、国分孝友
「超々臨界圧タービンプラントと若松超高温実証タービン」
三菱重工技報、Vol.25、NO.1、pp.1-7、(1988-1)

図 9　1000MW 級 USC タービンの構成

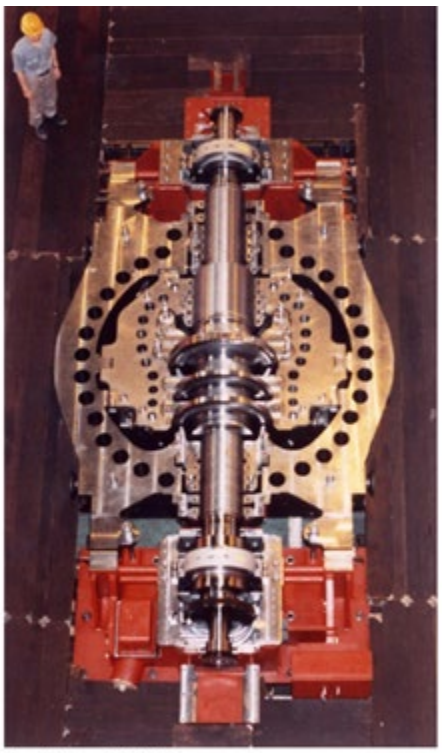

［提供］ ㈱東芝
［出典］ 藤川卓爾、「蒸気タービンの歴史(3)」
火力原子力発電、Vol.61、No.648、pp.36-61、(2010-9)

写真 1　高砂 SP タービン

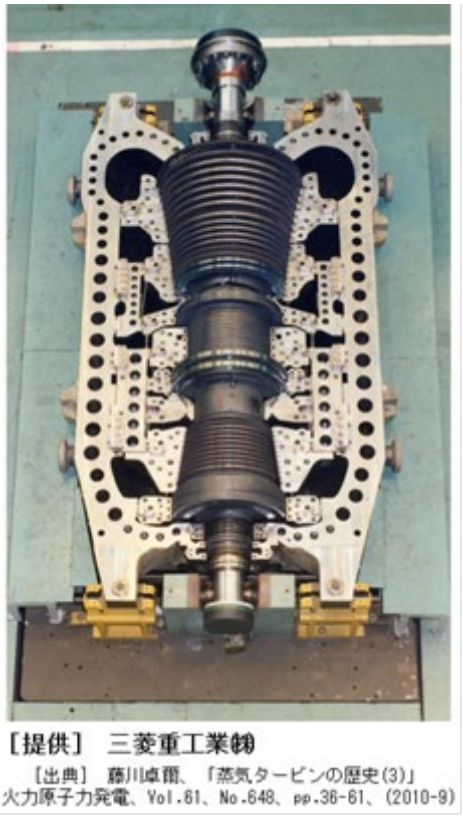


写真2　若松超高温タービン

＜参考文献＞

(1) 藤川卓爾、「エネルギーのはなし（その２）」、火力原子力発電、Vol.60、No.629、pp.32-40、(2009-2)

(2) 藤川卓爾、「「日本電力株式會社十年史」と「記念」誌」、火力原子力発電、Vol.74、No.796、pp.39-44、(2023-2)

(3) 藤川卓爾、「蒸気タービンの歴史（３）」、火力原子力発電、Vol.61、No.648、pp.36-61、(2010-9)

(4) 肥爪彰夫、「超々臨界圧発電ー技術と経済性ー」、日本機械学会第 71 期通常総会講演論文集、No.940-10（Ⅲ)、新技術開発レポート、(1994-3)

(5) 花田 剛、肥爪彰夫、藤川卓爾、横田 宏、竹田頼正、国分孝友、「超々臨界圧タービンプラントと若松超高温実証タービン」、三菱重工技報、Vol.25、NO.1、pp.1-7、(1988-1)

。

「韓国の歴史を辿る旅」の同窓会

（S42/1967卒）藤川卓爾

平成28年（2016）2月に「韓国の歴史を辿る旅」を実施しました。「京機短信」No.273～281で報告したとおり、筆者は火力原子力発電技術協会で「火力発電の歴史」シリーズを担当した時の縁で元IHIのボイラエンジニア吉田敏明氏と知り合い、同氏の古代史や製鉄技術の歴史への関心から製鉄技術伝来元の韓国にもう一度旅したいとの気持ちを受けて一緒に旅をすることにしました。韓国の京機会員の鄭 泰亨（정태형 チョン テヒョン）先生も一緒に行くことになりました。さらに、「京機短信」で同行の士を募集したところ3名の参加者が増え6人の旅となりました。

2016年2月14日 慶州仏国寺にての集合写真

左から、鄭 泰亨（S50）、藤川卓爾（S42）、吉田敏明（S43早稲田大学）、

浅野保夫（S44）、田中庸彦（S51）、浅井伸宏（S58）

あれから10年経ちました。「韓国の歴史を辿る旅」の同窓会を計画したところ、浅井さんと京都の田中さんが参加してくれて3月20日（金）にJR東京駅近くの「いぶき」でランチを共に思い出を語りました。韓国の鄭先生にも連絡を試みましたが、お嬢様から鄭先生が昨年4月に亡くなられたとのメールを受け取りました。鄭先生は10年前の旅行時にはガイド役を務めてくれました。何処を訪れても事件と年代と人名がスラスラと出てくるのには驚きました。

最初に鄭先生のご冥福をお祈りして献杯をしました。10年の歳月は長いようでもあり短いようでもあり、久しぶりに話が弾みました。何といっても最近の目まぐるしい国際情勢は話題になりました。

浅井さんは引き続き外国の会社との仕事を続けています。若い頃にドイツで暮らしていたことや帰国してからの子どもさんが苦労した話などを聞き、そんなことがあったのかと驚きました。

田中さんは毎日のように伏見稲荷大社に参拝し、訪れる外国人と話をしています。国によって日本人が言うことをよく聞いてくれる人たちと全然聞かない人たちがいるようです。外国人観光客の神社境内にふさわしくない行動に対して最近は神社側が注意をするようになったので良くなったそうです。

藤川は横浜と淡路島の二拠点生活で「少年少女発明クラブ」や「ビーチクリーニング」の活動をしていることについて話しました。田中さんから、「自分は今10年前の藤川さんと同じ歳になった。これからの10年をどう過ごそうかと思っているが、藤川さんは10年前に何を考えていたのか？」と聞かれて直ちには答えられませんでした。しばらく考えて「故郷の淡路島で『出前授業』をしたいと思い、知り合いの伝手で高校や市の教育長に売り込みに行った結果が今の『少年少女発明クラブ』に繋がった」ことを思い出しました。

浅井　　藤川　　田中

ランチの後、前日に標準木の開花宣言があった靖国神社に参拝しましたが、神社境内も皇居の千鳥ヶ淵も桜の花はまだ疎らでした