



京機短信

KEIKI short letter

No.416 2026.5.7

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

- ・ 関東支部 2026年度総会・講演会報告……村上弘記、尾形秀樹 (pp. 2-3)
- ・ 第11回 大阪あそ歩「江口の里を訪ねて」の報告……坂口保彦 (p. 4)
- ・ 超高温蒸気タービンの思い出(後編)……藤川卓爾 (pp. 5-30)
- ・ 機械自主研究室について……松久 寛 (pp. 31-32)



京機会関東支部総会集合写真

関東支部 2026年度総会・講演会報告

関東支部長 村上弘記 (S60/1985卒)

事務局長 尾形秀樹 (H6/1994卒)

2026年4月11日(土)に東京駅前の日本工業倶楽部会館にて関東支部総会を開催いたしました。49名の支部メンバーが集まり和気あいあいとした雰囲気で開催いたしました。

総会は、村上支部長(1985卒)、仲田京機会会長(1979卒)の挨拶の後、2025年度の活動報告、会計報告、会計監査の報告、2026年度の新役員案、予算計画、活動計画を提案し、出席者により全て承認されました。

続いて平山朋子教授(機械理工学専攻)より、大学の近況を紹介いただきました。国際卓越研究大学に関する話題は参加者の興味を集めました。

特別講演会では、早稲田大学理工学術院基幹理工学部教授でAIロボット協会理事長などとしても活躍される尾形哲也様より、「Physical AIのためのロボットデータエコシステムへ向けて」と題した講演をいただきました。センサーとアクチュエータを統合しAIを活用することで複雑な現実空間でさまざまな行動をするフィジカルAIに関し、たくさんの動画を使ってその最先端を紹介くださいました。想像以上に進化しているフィジカルAIの技術レベルの高さと、世界が変わり続けるそのスピードの速さに聴講者は驚きを隠せませんでした。



講演会(尾形哲也様)

その他、KARTに関する報告をプロジェクトメンバーの山下鴻様から、「学生と先輩との交流会 2026」の紹介を学生会SMILE会長の仁和一晟様からそれぞれいただきました。

総会・講演会の後は懇親会を行いました。今回は学部を卒業して4月から関東に移られた3名の新人を歓迎できるという、とてもうれしいことがありました。またちょうど前週のNHK番組『新プロジェクトX～挑戦者たち～ 英国を救った高速鉄道』にも登場された正井前支部長からプロジェクトや取材の秘話をお話しいただ

き、会場は大盛り上がりでした。最後は恒例の「琵琶湖周航の歌」を合唱し、さらなる京機会の発展を確かめました。



琵琶湖周航の歌 合唱

関東支部は設立25年を迎えました。この総会をはじめとして2026年度もゴルフ・写真同好会や異業種交流会など、OBの親交を深める楽しい取り組みを続けていきます。是非お気軽に御参加をお願いいたします。

<26年度関東支部役員>

支部長	村上弘記（1985卒）
副支部長	能勢幸嗣（1991卒）、平山朋子、児玉祐一（1996卒）
監事	山下真司（1988卒）
顧問	熊澤正博（1968卒）、正井健太郎（1982卒）
事務局長	垣見成巨（1991卒）
事務局次長	杉中智祥（1992卒）

第11回 大阪あそ歩「江口の里を訪ねて」の報告

坂口保彦 (S54/1979卒)

3月28日に第11回大阪あそ歩「江口の里を訪ねて」を参加者6名で行いました。

当日は晴天に恵まれ、また数日来の温かい気候により桜は三分咲きから五分咲き、途中の松山神社の紅梅もまだ数輪残っている中のあそ歩となりました。

JR吹田駅から北摂と大阪を結んでいた亀岡街道を進み、安威川にあった「吹田の渡し」跡ではこの街道が鉄道の開業、運河の開削により交通の主役を終えたこと、「新京阪橋」では阪急京都線の歴史、相川駅では駅を中心とした放射線状と同心円状の道、学校の誘致から開発計画に思いを馳せました。

奈良時代末期に和気清麻呂が治水工事で淀川と安威川を結ぶ運河を今の江口付近で開削したことにより、平安時代には人、物資の集積する港町として大いに賑わった江口ですが、現在は「江口の君堂」を除き過去の賑わいの片鱗は残っていません。江口の君堂では、歌人西行法師と「妙」の物語を題材にした謡曲「江口」の概略、淀川両岸には謡曲の舞台となった場所が多いこと、江口の君こと「妙」は君堂以外に野崎観音に観音堂を寄進していたことなどを学びました。また、運河の堤防は現在は道路として活用されています。

その後、昼食・懇親会を行い、事故なく解散しました。

超高温蒸気タービンの思い出（後編）*

Memories of Very High Temperature Steam Turbine – Part 2

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)

4. 材料の開発

4.1 フェライト系材料の開発

ロータについては、従来の12Crロータ材は582°Cが使用限界であるので593°C用に新しい12Crロータ材が開発された。開発に当っては大容量USCタービンの概念設計から明らかになった材料に対する要求仕様を目標にした。すなわち593°Cにおけるクリープ強度が永年の使用実績を有する従来のロータ材が566°Cで有しているクリープ強度と同等以上であることを始め、高温低サイクル疲労強度、引張強度と延性、韌性等の特性が従来ロータ材と同等以上であることが目標とされた。

合金鋼成分のCr量が12%付近で高温強度が最大になることは古くから知見があり、12Cr鋼として利用されている。タービンロータのような大型の鋼材ではCr量を12%にするとδフェライトが発生するのでCr量を10.5%程度に抑えているが、慣例的に12Crロータと呼んでいる。東京電力（株）とメーカー3社との共同研究の成果や、東京大学の藤田利夫教授（当時）の研究成果、製鋼メーカーにおける溶解、インゴット製造、鍛造、熱処理等ロータ製造にかかわる技術開発の成果を反映して、所期の目標を満たす12Crロータ材が開発された⁶⁾。このロータ材は開発者の名前からTMK1と名付けられた。Tは東京大学、Mは三菱重工業（株）、Kは（株）神戸製鋼所の頭文字である。

筆者は藤田教授のお宅にもお伺いしたことがあるが、藤田教授はともかく研究熱心な方で、「除夜の鐘を研究室で聞くようではなければ研究はできない。」と言っておられた。藤田教授は永年にわたる研究の結果、12Cr鋼の高温強度を高めるた

* 短信編集委員会より：火力原子力発電技術協会より、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。今月号では後半を掲載させていただきます。

めにはMo（モリブデン）等量1.5%が最適であることを見出しておられた。Mo+1/2Wをモリブデン等量と呼ぶ。

三菱重工業（株）では長崎研究所の材料研究室が開発に当たったが、設計部門でも3.1項で紹介した筆者の一回り上の先輩が材料開発に専念した。この先輩は設計部門に所属していながら、問題があれば何事についても独自に研究して研究所の専門家に匹敵するレベルまで到達していた。技術に妥協をせず自分にも厳しい人であった。

（株）神戸製鋼所は現在ではタービンロータから撤退しているが、当時は国内で唯一ESR（Electro Slag Remelting）設備を保有していた。図10にESR設備の概念図を示す。ロータ製造時には、通常は溶解した鋼を鋳込んでインゴットを製造する。インゴットは外周側からゆっくりと凝固して行き最後に中心部が固まるのでこの間に成分が場所によってばらつく偏析が生じ易い。ESRでは電極として使用するインゴットの直径を細くできるので、中心部まで凝固するのに要する時間が短く、電極中での軸方向の偏析が起こりにくい。次にこのインゴットを電極として使用し、水で冷却された鋳型の中で放電しながら再溶解、急凝固させるので、半径方向の偏析も防止でき、組織の微細・均一化、非金属介在物の低減が図れる。

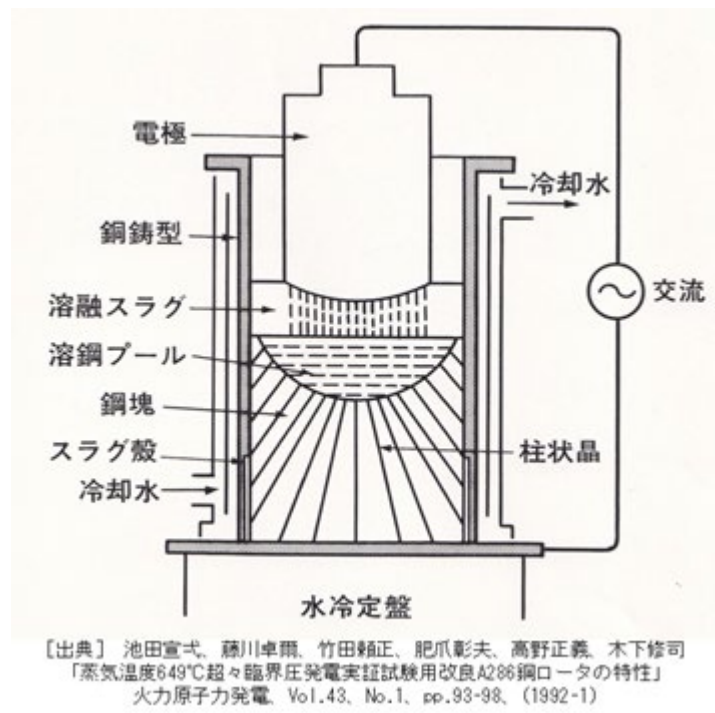


図10 ESR設備概念図

TMK1材は藤田教授の知見からMo等量を1.5%とした。WはMoより融点が高いことから高温でより安定であると推定されたが、この時点では大型鋼材でのWの効果が十分に確認されていなかったためWは入れずMo単独で1.5%とした。その後、引き続いてWを入れた大型鋼材の試験を実施した結果、さらに高温強度に優れたTMK2材も開発された。

写真3に若松超高温タービンSTEP I 向けのTMK1ロータを示す。

内車室等の静止部に対しても従来566℃までに用いられていたCrMo鋳鋼やCrMoV鋳鋼より高温強度の高い12Cr鋳鋼が開発された。この材料は、三菱重工業（株）と日本鋳鍛鋼（株）（JCFC）が共同開発したのでMJC12と命名された。12Cr鋳鋼と呼んでいるが、ロータ材と同様に δ フェライトの発生を避けるためにCr量は9.5%程度に抑えられている。

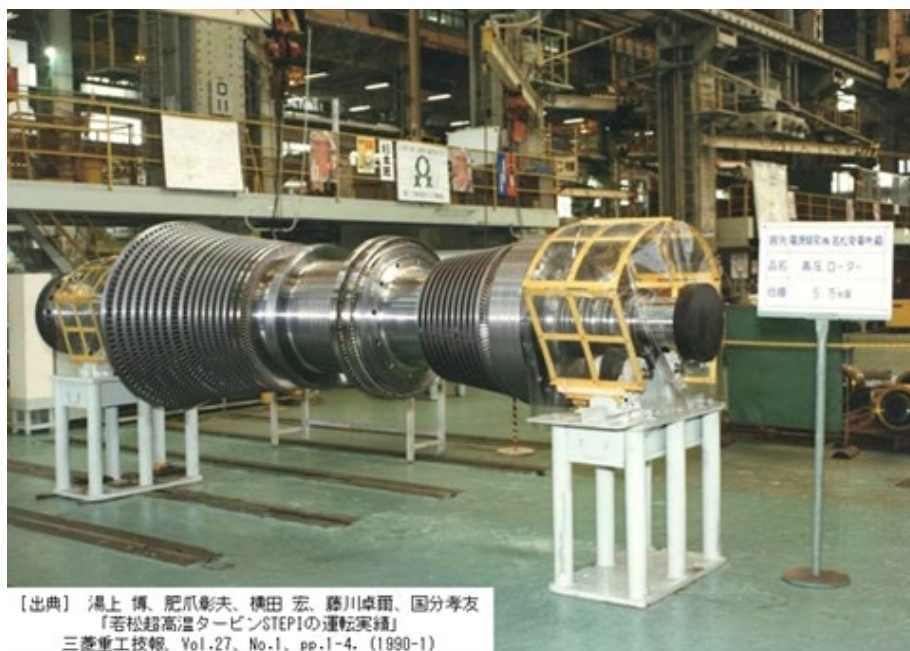


写真3 若松超高温タービンSTEP I 向けTMK1ロータ

4.2 オーステナイト系材料の開発

649℃ (1200°F) の温度は当時並びに現在の技術レベルでもフェライト系の材料では無理なのでオーステナイト系の材料を使用する必要がある。オーステナイト鋼は、フェライト鋼が体心立方格子であるのに対し、面心立方格子の構造であるため滑り面の数が少ないのでクリープ強度が高いという特徴があり、650℃級でも使用可能である。オーステナイト鋼は合金元素を多く含むため偏析が欠陥になり

やすいので大型鋼塊を欠陥なしに作るのが難しい。また、変態点がないので熱処理で結晶粒を微細化することができず、結晶粒微細化のためには比較的低温で大きな変形を与える必要がある。このためESR法や、大型の鍛造プレスが必要となる。

1980年当時の開発開始段階では1000MW級USCタービンのVHPロータに必要な完成重量約11tのオーステナイトロータが製造できるかどうか分らなかった。そこで、オーステナイトロータの開発を進める間に基本蒸気条件（その1）に対応する実証試験をすることにした。

（株）神戸製鋼所でA286の成分で実機大の直径を有するテストロータを試作した結果、断面にフレックルと呼ばれるTiC（チタンカーバイド）の偏析が現れた。この様子を写真4に示す。フレックル部分は図11に示すように硬度が高く、脆い。図12に試作ロータの引張特性を示す。フレックルのある部分は低温では伸び、絞り低下してロータ材としては使用できないことが分かった。TiCの偏析を防ぐためにはTi量を低減しなければならない。TiはA286の高温強度の支え役であるが、設計側から強度を見直して、Ti量をギリギリまで低減した。これにより、フレックルは防止できたが、製鋼、鍛造工程上でも色々と解決すべき課題があり、（株）神戸製鋼所では何回かの失敗を重ねて遂に改良A286大型ロータを実現した⁷⁾。写真5に若松超高温タービンSTEP II 向けオーステナイトロータを示す。

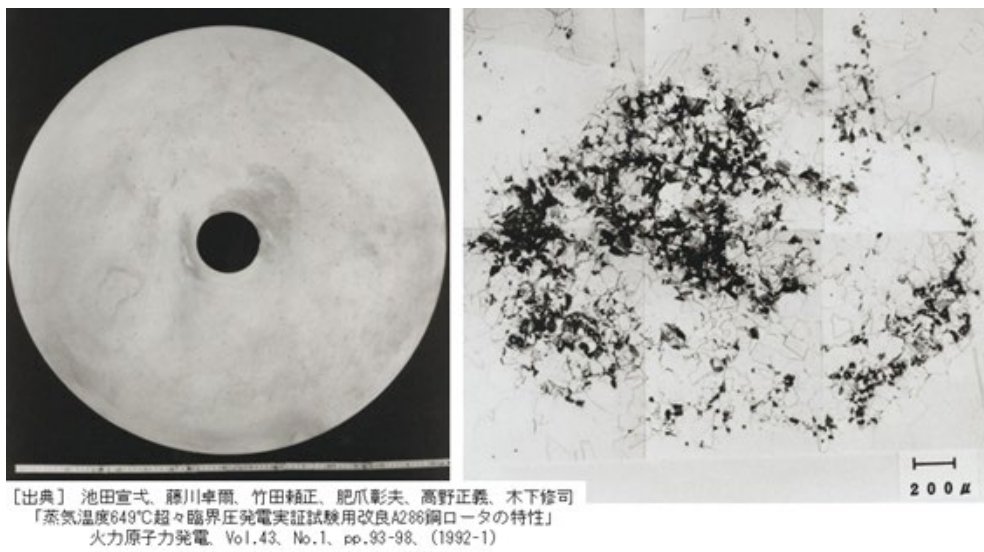


写真4 フレックル（TiCの偏析）

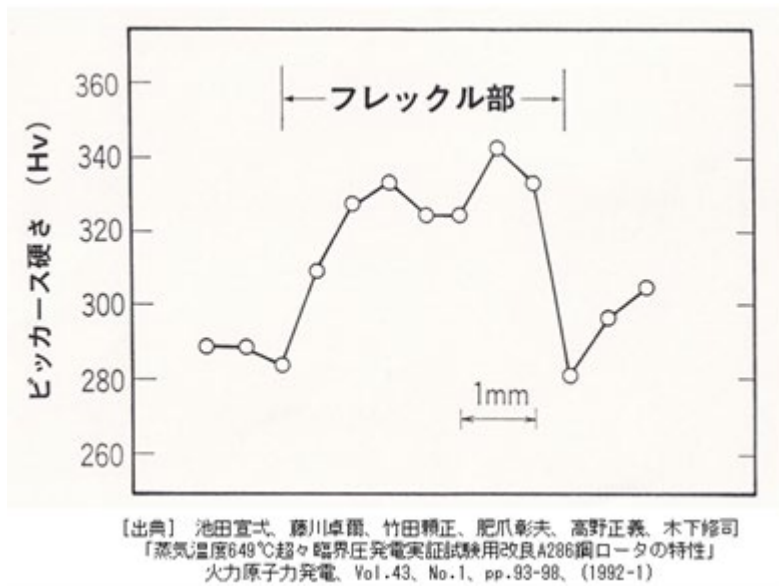


図11 フレックル部の硬度分布

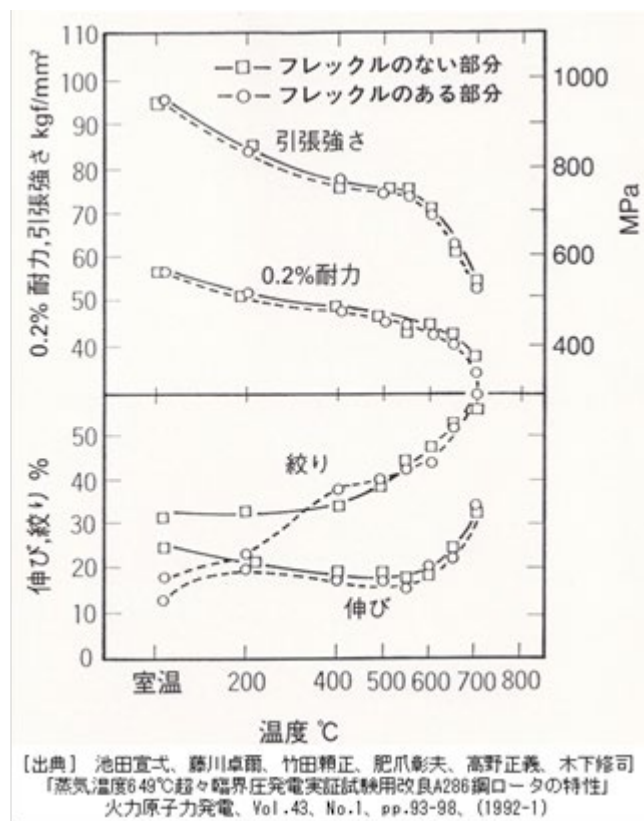


図12 試作ロータの引張特性

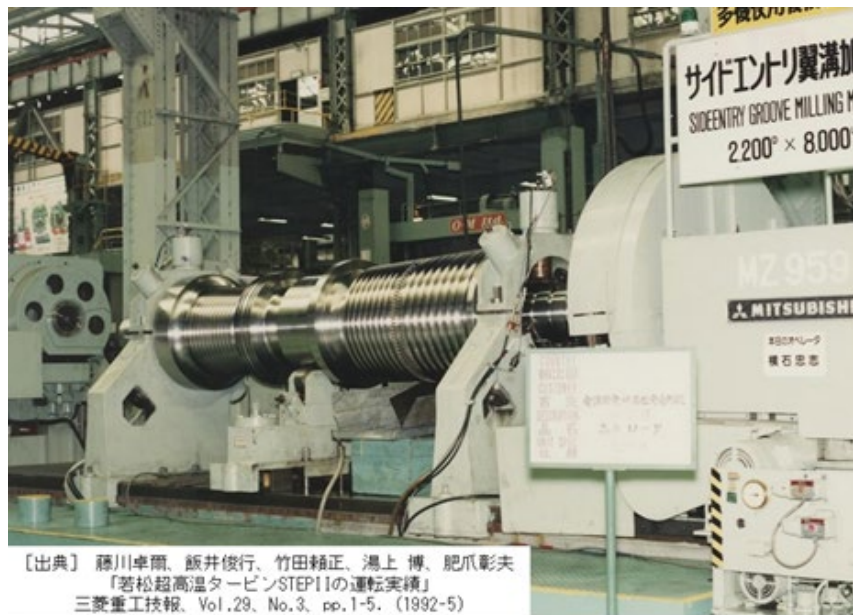


写真5 若松超高温タービンSTEPⅡ向け改良A286ロータ

5. 構造の開発

蒸気タービンには熱工学的問題点として次のようなものがある。

- (1) 高温部品のクリープ強度、変形
- (2) 熱応力による低サイクル疲労、変形
- (3) 静止部と回転部の伸び、伸び差
- (4) 冷体起動時の予熱不足による脆性

これらの問題点は、蒸気タービン部品の材料の特性と、蒸気とメタル表面との熱伝達による各部品の定常、非定常温度分布に大いに関連する。

超高温蒸気タービンの熱工学的問題点も基本的には通常の蒸気タービンと同様であるが、超高温タービンに特有の事情として次のものがある。

a. 蒸気温度が高いことによるもの：

通常の蒸気タービンより蒸気温度が高いため、上記の(1)～(3)に対する温度条件が厳しくなる。従って、より高温強度が高い材料を使用するか、同じ材料を使用する場合には何等かの方法で温度や温度差あるいは応力を下げることが必要である。

b. 材料の特性によるもの：

より高温強度が高い材料としてオーステナイト鋼を使用する場合にはオーステナイト鋼の材料特性によって注意すべきことがある。主要弁や内車室の候補材で

あるSUSF316H鍛鋼はクリープ強度が高いが降伏点が低いため、過大な熱応力を与えると塑性変形を生じたり、熱応力の繰り返しのよって低サイクル疲労によるクラックを生じたりする。

このように超高温蒸気タービンでは、通常の蒸気タービン以上にクリープと熱応力が問題となる。クリープに対しては温度と応力を低減することが最も有効である。このため超高温部の冷却による温度・温度差の低減と、内圧応力、遠心応力、熱応力等の応力低減によりクリープ強度の向上を図る必要がある。熱応力に対しては同一部品内の定常・非定常温度差を低減することが有効であるのでその点を工夫する必要がある。また、熱応力を低減するためのフレキシビリティを有する構造を採用するとともに、伸び差に対する対策も必要である。

超高温用構造の基本的な考え方は下記のとおりである。

(1) 温度の低減

蒸気による冷却、サーマルシールドによる温度低減

(2) 温度差の低減

高温部の冷却と低温部の過冷却防止、部品の分割、肉厚の減少

(3) 応力の低減

内圧応力の低減、遠心応力の低減、熱応力の低減

これらの具体策については次の6.項で述べる。

6. 若松超高温タービンの設計と製作⁸⁾

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では、昭和38年（1963）運開の若松発電所2号75MWタービンの高中圧タービンを超高温タービンに新製換装、低圧タービンと発電機を流用して実際に50MWの発電をして諸データを取得した。超高温タービンは1000MW級USCタービンのVHPタービンを模擬したものとした。

この超高温タービンの設計・製造は三菱重工業（株）が担当した。三菱重工業（株）では125MW以下のタービンは高中圧エレメントにインパルスタービンを採用するのが通例であったが、中圧タービン入口部のロータ冷却を考慮して50MWでもリアクションタービンとした。蒸気圧力は既設機と同じ10MPa(102kgf/cm²)である。

図13に高中圧タービンの鳥観図を示す。この図はSTEP Iの状態を示す。

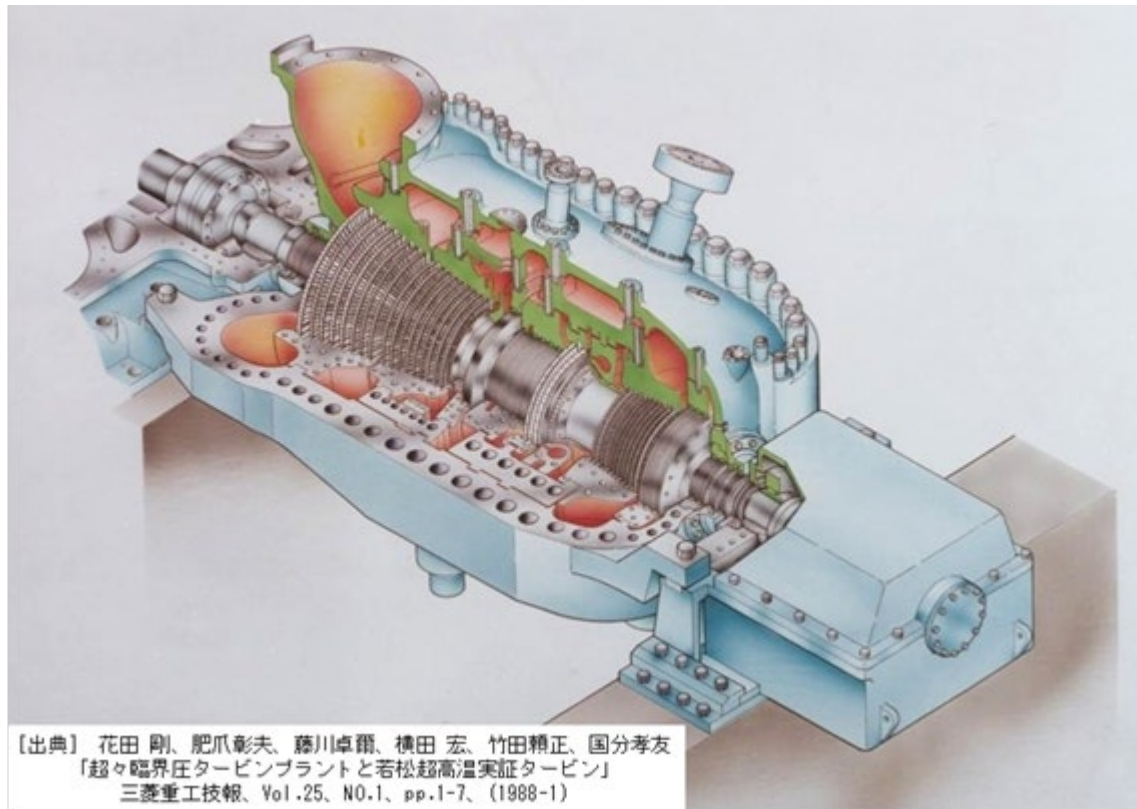


図13 STEP I 高中圧タービン鳥観図

このタービンの設計では次のことを考慮した。

(1) 形状の単純化による応力・伸び差の低減

図14に主蒸気入口部の断面を示す。主蒸気入口管を半径方向にすることによって、内車室やノズル室の蒸気入口部を軸対称体として単純化し応力を低減した。従来の蒸気タービンは分解・組立作業が容易になるように主蒸気入口管は図15に例示するように垂直方向に配置されている。タービンの運転時には外車室、内車室、ノズル室の温度が異なるので、停止時からの熱膨張量が異なる。従来の配置では主蒸気入口管と内車室蒸気入口管貫通部、ノズル室蒸気入口部の中心位置がずれて偏心が生じるが、ラジアル配置では偏心がなくなる。ラジアル配置では外車室、内車室の分解・組立時に主蒸気入口管が邪魔になるので、取り外し可能なフランジ取り付け構造にした。

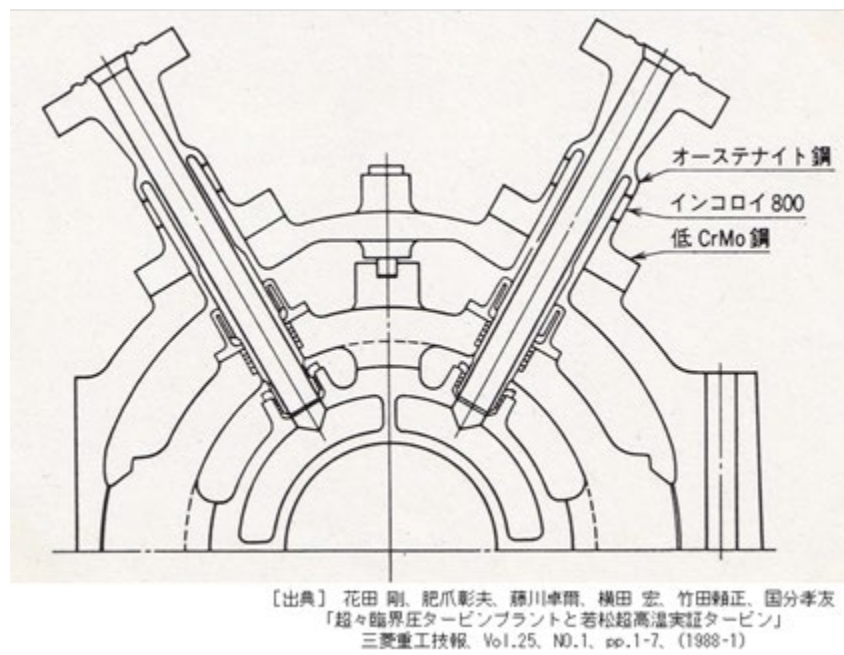


図14 主蒸気入口部

(2) 高温部品の冷却

STEP I では主要部品に12Cr鋼を使用するので、超高温蒸気に対応するために部品の冷却に留意した。従来から採用しているマスフロークーリングによるノズル室の冷却や、中圧タービン入口のロータ冷却を実施した。マスフロークーリングはWestinghouse社で考案された方法で、高温蒸気を内蔵する圧力容器の外側を低温蒸気で冷却することによって圧力容器の平均温度を下げる。一方、内外面の温度差によって熱応力が生じる。この熱応力は内面が圧縮、外面が引張りである。内圧応力（弾性応力）は内面から外面までほぼ一様の引張り応力となるので、熱応力と内圧応力の合成応力は図16に模式的に示すように内面側で小さく、外面側で大きな引張応力となる。材料の許容応力は温度の高い内面側で小さく、温度の低い外面側で大きくなるため、内面側から外面側まで発生応力が許容応力に対してほぼ同等の余裕を持つ。

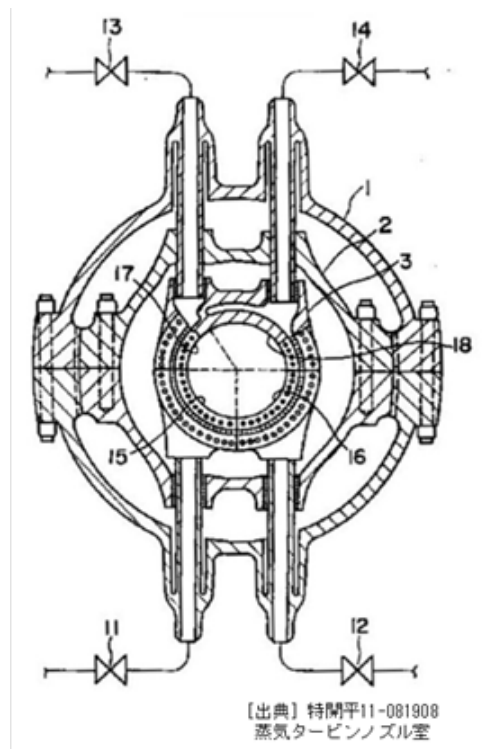


図15 従来型の主蒸気入口部の例

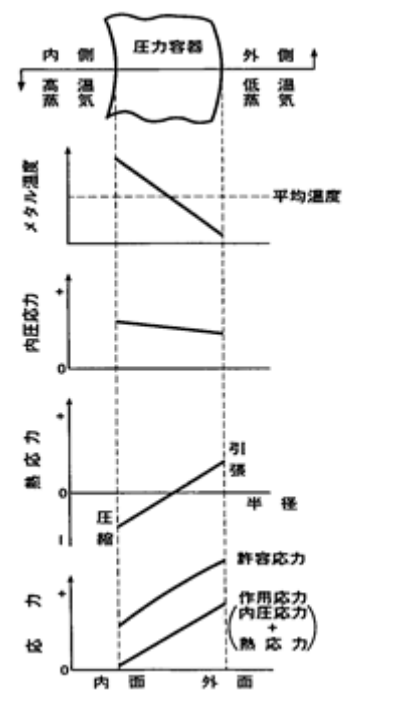


図16 マスフロークリーニング

図17に調速段部分のノズル室とロータ冷却構造を示す。調速段で仕事をして温度が低下した蒸気は反転してノズル室の外側を回って高圧タービンに流れていく。ノズル室はこのマスフロークーリング効果で強度が確保される。一方、ノズルを出て調速段動翼に入らずに漏洩する蒸気は仕事をしないので温度が高く、この蒸気がロータの表面に触れるとロータの温度が上がる。これを防止するために従来から調速段のディスクにポンピングホールを開けて調速段出口の低温蒸気を汲み上げてノズル室内周部を冷却することが行われていた。超高温タービンではさらにロータ冷却を強化するためにノズル室の内周側にフローセパレータを設置した。これにより、ノズル出口の高温漏洩蒸気はロータ表面から隔離され、ロータ表面にはポンピングホールからの低温蒸気が流れる。

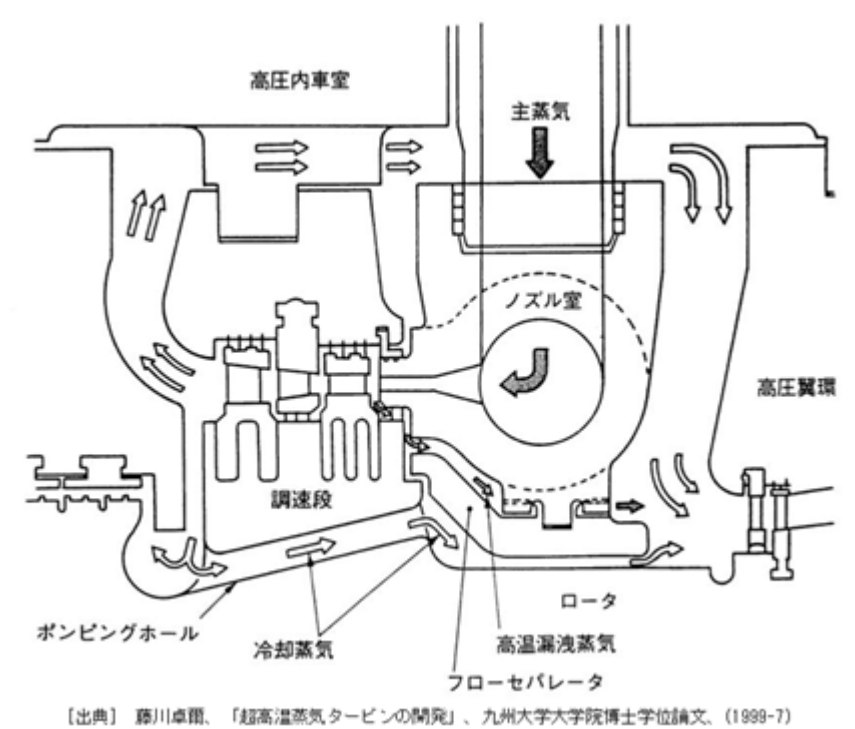


図17 調速段部の冷却構造

中圧タービン入口部では、従来と同様に図18に示すようにロータの第1段動翼翼溝底部に冷却蒸気通路を設けて、動翼前後の圧力差を利用して、高圧タービンから導入された低温の蒸気を流すことによりロータを冷却する。これにより中圧入口部のロータ温度を下げるができる。また、中圧内車室内面にサーマルシールドを設けて、高温再熱蒸気が高流速で内車室内面を加熱しないようにした。

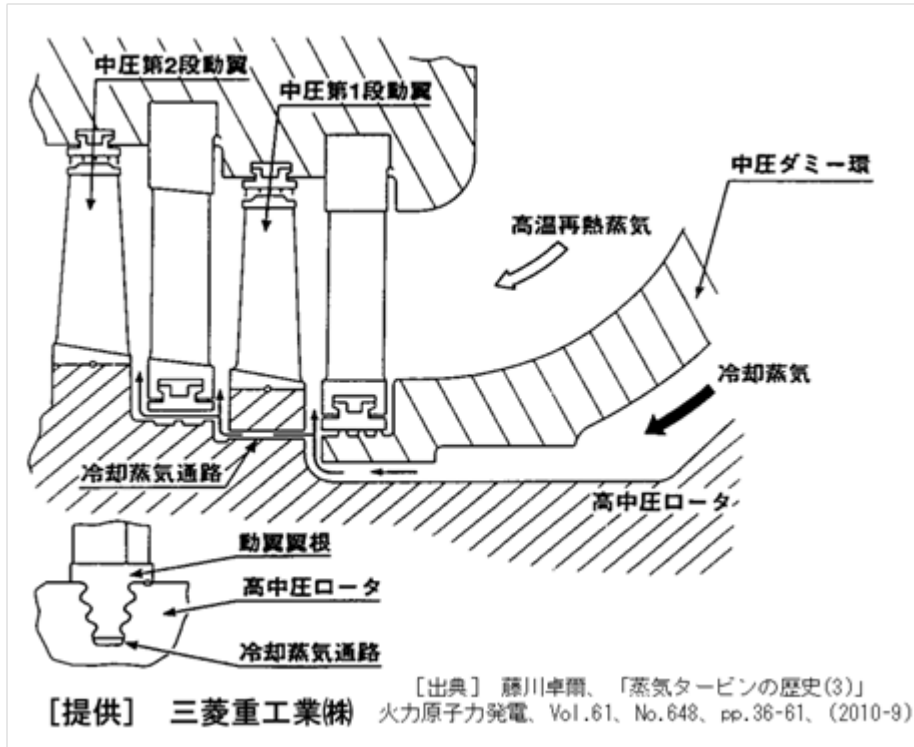


図18 中圧タービン入口部ロータ冷却

(3) オーステナイト部品の熱応力低減

STEP IIではオーステナイト鋼を用いる部品の熱応力低減に留意した。高温タービン要素試験で得られた知見から、SUSF316H鋼製の高圧内車室の内外温度差を低下させる工夫をした。STEP Iで実施したマスフロークーリングによるノズル室冷却をすると、反転蒸気によって高圧内車室の内面が加熱されるので蒸気の反転を止めた。そうすると主蒸気入口管のタービン軸方向位置が変わってくる。これに対応するために、フランジ取り付けとした主蒸気入口管のフランジを長円型にして、STEP IIではSTEP Iから反転して取付けることにした。長円型フランジは図13に描かれている。高圧内車室の内面が高速蒸気流に曝されないように、高圧翼環の入口側を伸ばして调速段のカーチス翼環と一体化してサーマルシールドの役割を持たせた。高圧内車室の外表面はより低い温度の蒸気に触れるので高圧内車室の外表面にはサーマルシールドを取付けて過度の冷却を防止した。これらの対策を図19に示す。

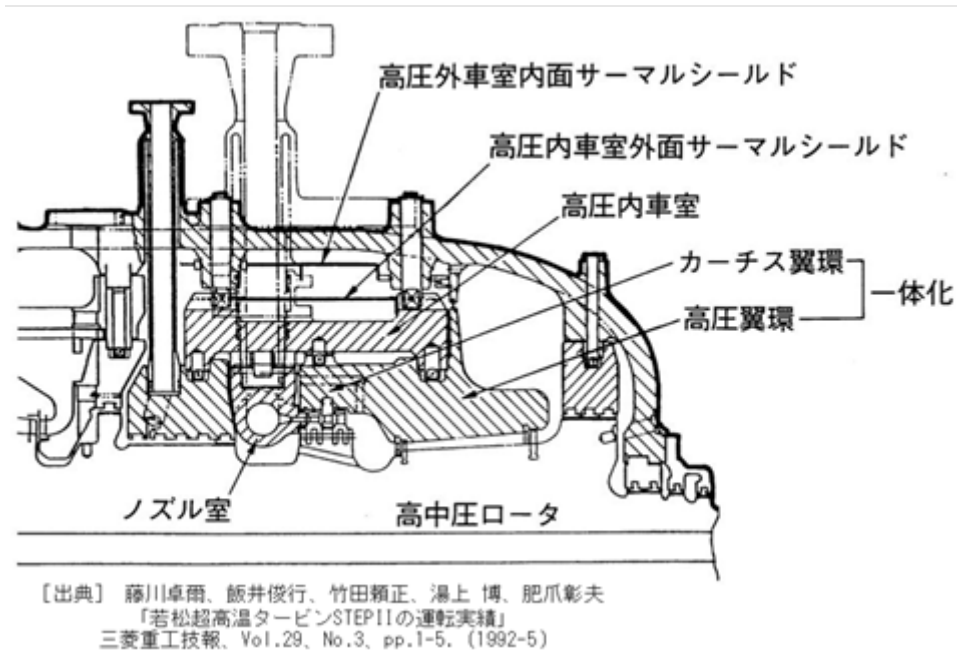


図19 STEPⅡ 高圧内車室変形防止

(4) オーステナイトロータの伸び差対策

STEPⅡではオーステナイトロータを用いるので高中圧タービンの伸び差が大きくなる。高中圧ロータを低圧ロータと直結すると既設流用の低圧タービンでは軸方向の接触が生じることになる。この対策として、高中圧ロータと低圧ロータの間にダイヤフラムカップリングを挿入した。図20にダイヤフラムカップリングを示す。ステンレス鋼製のダイヤフラムを4枚使用して、軸方向に変形しながらトルクを伝達することができるようにした。軸方向の変形を吸収するためにはダイヤフラムが薄い方が良いが、トルクを伝達する必要があるので余り薄くするとねじり座屈が発生する。ダイヤフラムを4枚使用しても伸びの吸収量が予想される伸び差最大値に対して余裕がなかった。そこで、低圧ロータのスラスト軸受に5mmの軸方向の隙間を持たせて、冷体時にはロータを高中圧タービン側に寄せてさらにダイヤフラムカップリングを引っ張った状態で設定した。高中圧タービンの伸び差が大きくなっていくと、先ずダイヤフラムカップリングの引っ張りが減少し、次にスラスト軸受内部で低圧ロータが発電機側に移動し、スラスト軸受の発電機側の隙間がなくなった状態から、ダイヤフラムカップリングが圧縮され伸び差を吸収するようにした。

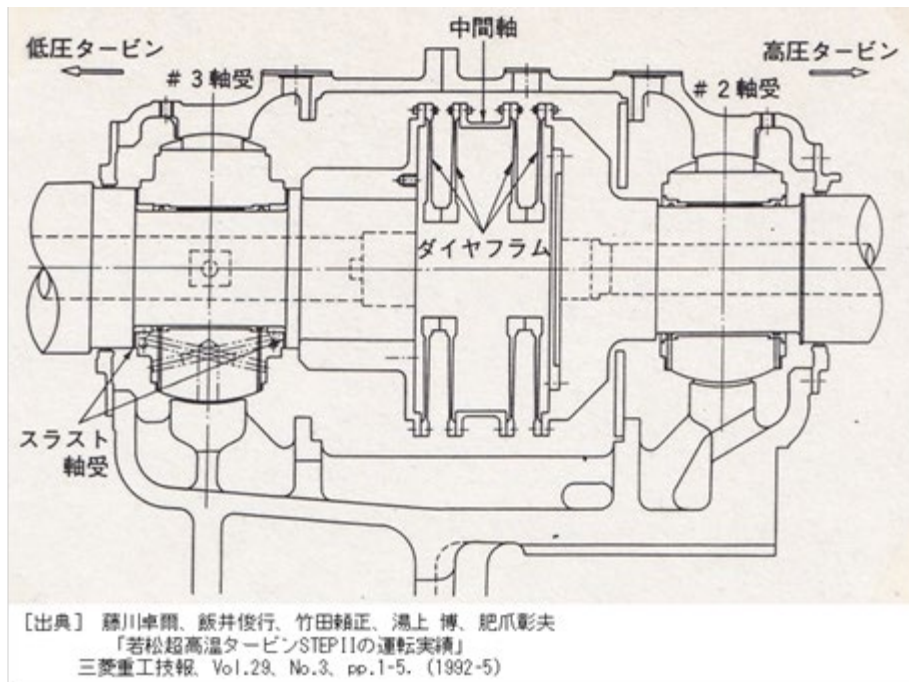


図20 ダイヤフラムカップリング

(5) ロータ表面温度計測

1000MW級USCタービンの設計に資するためのデータ計測が実証試験の目的であるので、タービン内部の圧力・温度が計測できるようにした。図21にタービン各部の計測点を示す。ストレインゲージを貼り付けてボルトの応力計測も実施した。

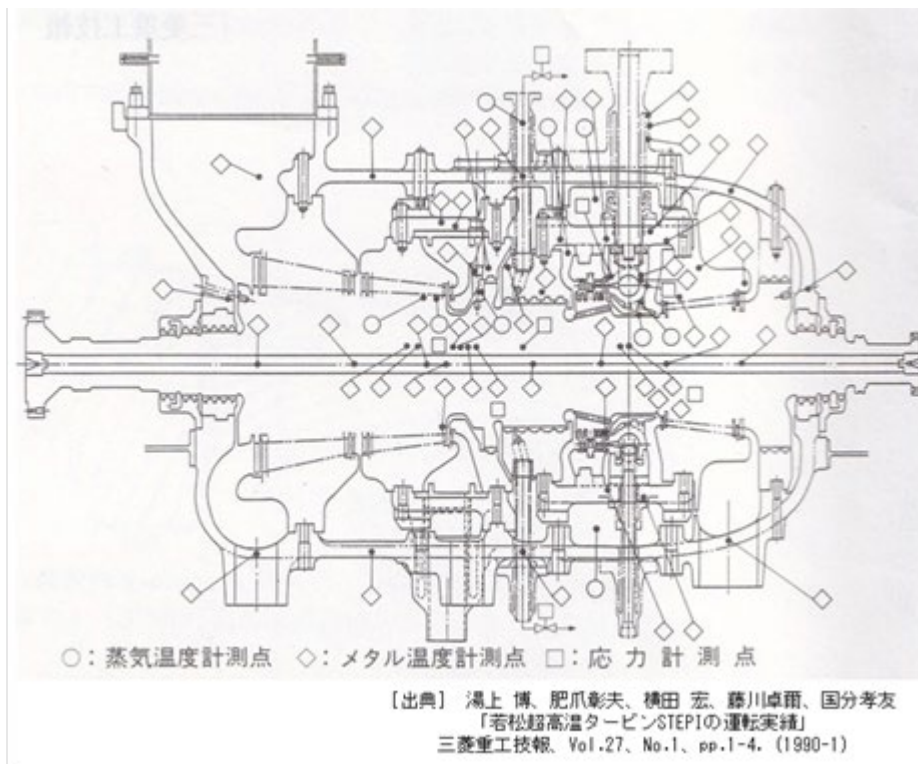


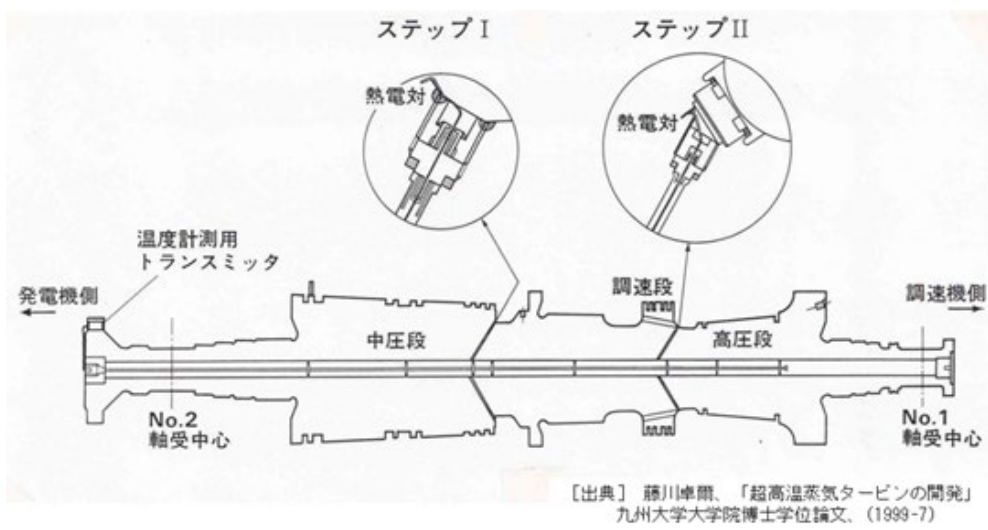
図21 温度・応力計測点

静止部の温度計測は従来から実施されていたが、回転部については試験的にロータ中心孔温度計測が実施されたただけであった。ロータの表面温度を計測するために、中心孔からロータ表面に細い穴をあけて熱電対を通した。写真6にSTEP I 調速段ディスク入口部のロータ表面温度計測用の熱電対設置状況を示す。それまでの試験的なロータ中心孔温度計測のときは、計器用電源としてカップリングのボルト穴に乾電池を入れていたが、超高温タービンでは電源も温度計測の信号と同様にロータに巻き付けたコイルで送るようになった。これは当時世界初の技術であった。ロータ表面温度計測装置を図22に示す



【出典】 花田 剛、肥爪彰夫、藤川卓爾、横田 宏、竹田雅正、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)

写真6 調速段ディスク表面温度計測用熱電対



【出典】 藤川卓爾、「超高温蒸気タービンの開発」
九州大学大学院博士学位論文、(1999-7)

図22 ロータ表面温度計測装置

(6) 中圧タービン入口部ロータ冷却蒸気温度変化

「1000MW級USCタービンの設計に資する」ことのうちの大きな部分はタービン各部の温度を把握することである。タービン部品の温度は周りの蒸気温度と部品表面の熱伝達率で決まる。蒸気温度は計測可能であり、計算からも正確に求めることが可能である。熱伝達率は部品表面の蒸気流速などから求める理論式があるが、タービン部品の形状が複雑なため局部表面流速を正確に求めることができない。実機の温度計測をすることができれば、周りの蒸気温度から熱伝達率を仮定して計算で求めた温度と比較することによって、仮定した熱伝達率が妥当かどうかを判定することができる。

中圧タービン入口部のロータ冷却は従来から実施されてきた技術である。超高温タービンではこの冷却蒸気の温度を変化させることができるようにした。図23に示すように、中圧タービン入口部のロータ冷却蒸気はそのほぼ全量が高圧タービンの調速段出口部から高圧ダミー環、中圧ダミー環を漏洩してきたものである。高圧ダミー環には5つのシールリングが設けられている。4番目のシールリングと5番目のシールリングの間から蒸気を抜いて高圧タービンの排気部にバイパスできるようにした。バイパス弁を開いてバイパス量を増やしていくと、中圧ダミー環に流入する高圧ダミー環からの漏洩蒸気量が減少するので、高圧タービン排気部から高圧タービン内車室の外側を回って合流してくる低温蒸気が増えてくる。このようにしてバイパス量によって中圧ロータ冷却蒸気の温度を変えることができる。

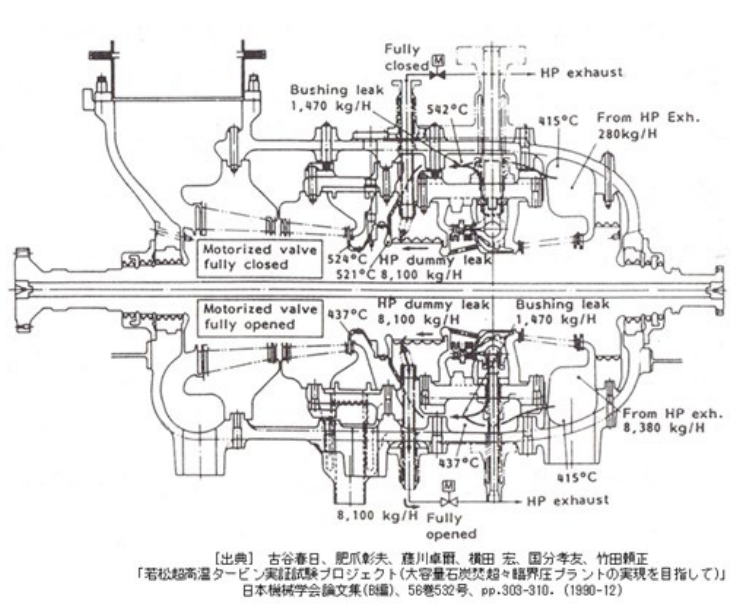


図23 中圧ロータ冷却蒸気温度変化機構

7. 若松超高温タービン実証試験^{9), 10)}

STEP I の実証試験は昭和61年（1986）11月30日に初通気し、昭和62年（1987）3月20日から約3年間実証運転した。タービン運転時間は14,300時間、発停回数は210回である。この実証運転でDSS（Daily Start and Stop）運転に耐えられるものであることが示された。STEP I の実証試験終了後、主蒸気温度を593℃から649℃に上昇することに伴って、主要部品を換装した。図24にSTEP I からSTEP II への交換部品を示す。

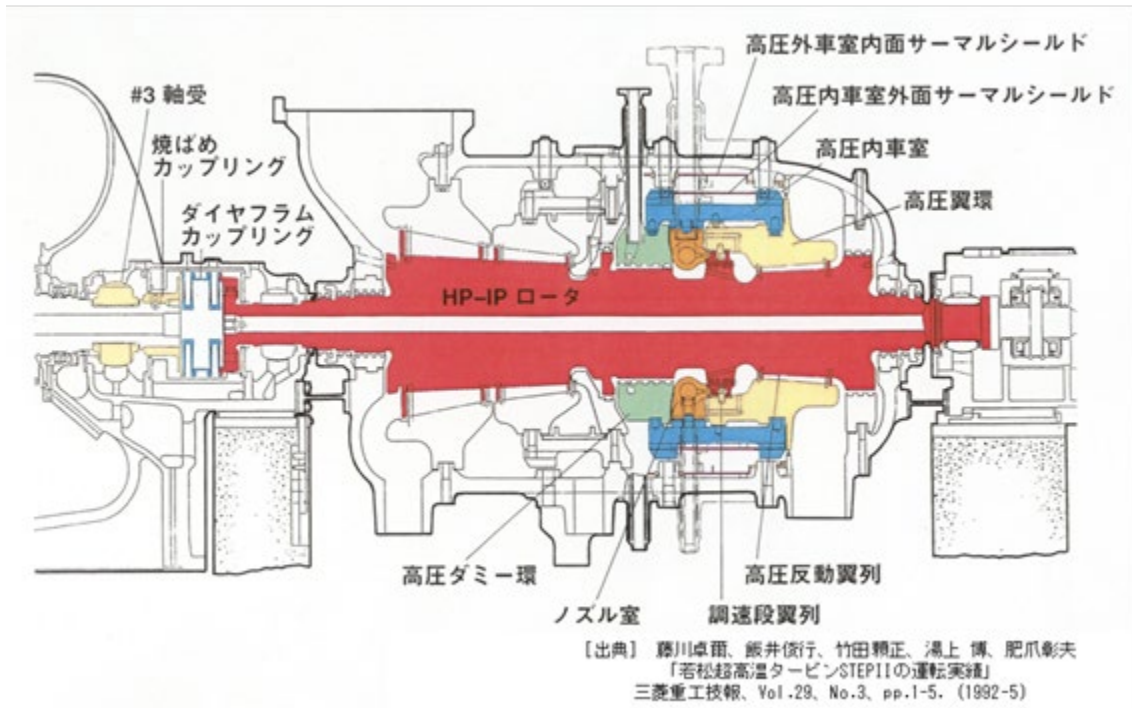


図24 STEP I → STEP II 換装部品

最大の部品は高中圧ロータである。12Cr系のTMK1ロータからオーステナイト系の改良A286ロータに換装した。高圧蒸気に触れるノズル室、高圧内車室、高圧翼環、高圧ダミー環もオーステナイト系のSUSF316H鍛鋼製の部品に交換した。

6. (3) 項で述べたように、STEP I とSTEP II で主蒸気入口管の軸方向位置が異なるので、長円形のフランジを反転して取り付けた。この他、オーステナイトロータの伸び差対策としてダイヤフラムカップリングを設置するために低圧ロータの軸端部を改造し、カップリングを一体型から焼き嵌め型にした。低圧タービンの前部軸受はジャーナル軸受とスラスト軸受を兼ねるものと交換した。

STEP II の実証試験は平成2年（1990）8月1日に初通気し、同年9月28日から約1年3ヶ月間実証運転した。タービン運転時間は5,130時間、発停回数は52回であ

る。この実証運転でWSS（Weekly Start and Stop）運転に耐えられるものであることが示された。写真7に世界最高の蒸気温度649℃で運転中の主蒸気入口管を示す。保温に穴をあけて主蒸気入口管の外面が観測できるようにしたものであるが、鋼が赤くなっていることが分かる。



【出典】 藤川卓爾、「超高温蒸気タービンの開発」、九州大学大学院博士学位論文、(1999-7)

写真7 649℃で運転中の主蒸気入口管

(1) 蒸気条件変化試験

蒸気条件が変わると性能が変わるが、実証試験では実際に主蒸気・再熱蒸気温度を変化させて性能の変化を計測した。表1、表2にその結果を示す。

理論的には主蒸気、再熱蒸気が28℃変わると、それぞれ相対値で0.8%ずつ性能が変わるが、実証試験でもほぼそれと近い結果が得られた。

表1 STEP I 蒸気温度変化試験結果

項目	蒸気条件		
	定 格	ケース1	ケース2
主蒸気/再熱温度 ℃	593/593	566/566	538/538
タービン熱消費率比較 (相対値) %	基 準	-1.8	-3.3

表2 STEP II 蒸気温度変化試験結果

項目	蒸気条件		
	定 格	ケース1	ケース2
主蒸気/再熱温度 °C	649/593	621/566	593/538
タービン熱消費率比較 (相対値) %	基 準	-1.3	-2.7

(2) 調速段付近の冷却効果

図25にSTEP I の調速段付近の蒸気・メタル温度の計測結果を示す。ノズル室内部の592.0°Cの蒸気は調速段で仕事をして546.8°Cまで温度が低下している。この蒸気がノズル室の外側を流れるのでマスフロークーリングの効果によって、ノズル室の平均温度は570°Cくらいまで低減されていると推定される。調速段出口の546.8°Cの蒸気は調速段ディスクに設けられたポンピングホールで汲み上げられて、ノズル室内周部に導入される。フローセパレーターの外周部ではノズル出口から漏洩してくる高温蒸気によって558.9°Cまで温度が上がっているが、フローセパレーターの効果によってフローセパレーターの内周部では544.2°Cとなっている。調速段ディスク部のロータ表面メタル温度は542.6°C、ロータ中心孔の表面温度は531.8°Cである。

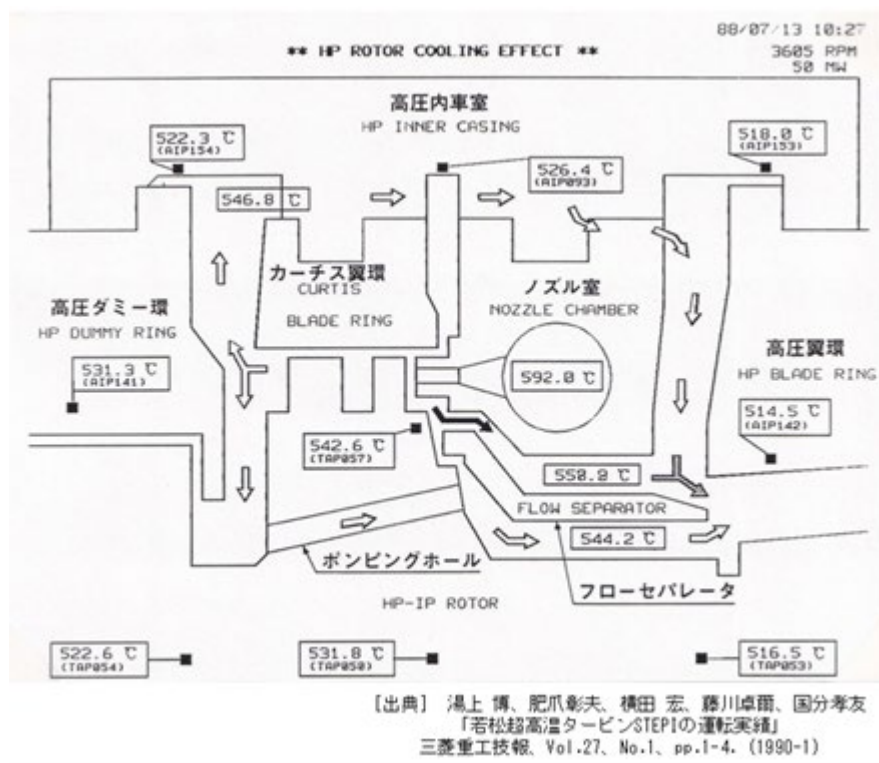


図25 STEP I 調速段付近蒸気・メタル温度

(3) 中圧入口部ロータ冷却

図26にSTEP I の中圧入口部の蒸気・メタル温度の計測結果を示す。再熱蒸気が592.3℃で入ってくる。これに対して502.2℃のロータ冷却蒸気が中圧第一段動翼の翼溝底に設けられた冷却蒸気通路に導かれてロータ表面を冷却する。これによってロータ表面温度は517.6℃まで冷却される。ロータ中心孔表面温度も503.3℃まで冷却されている。

図27にSTEP I の中圧入口部ロータ冷却蒸気温度変化試験の結果を示す。

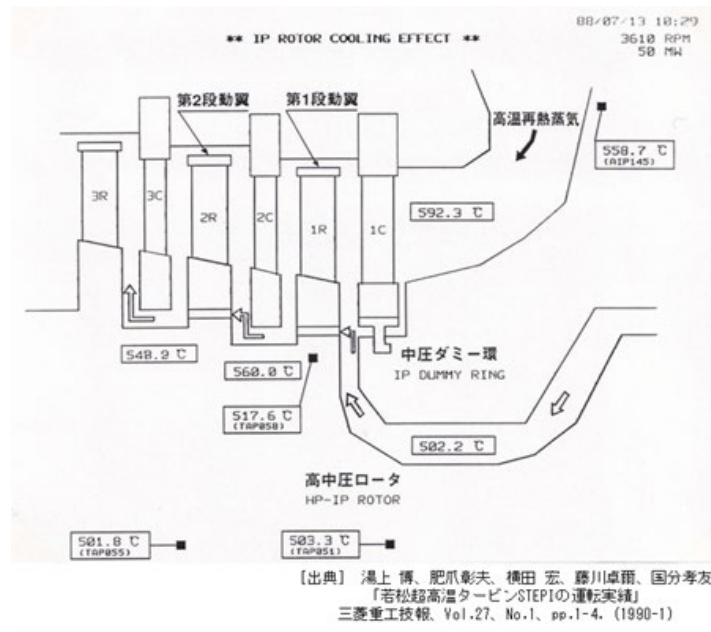


図26 STEP I 中圧入口部蒸気・メタル温度

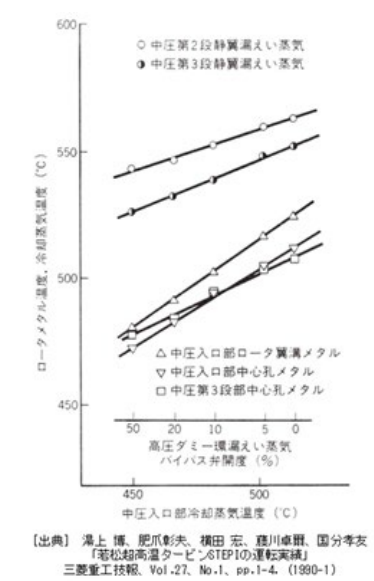


図27 中圧入口部ロータ冷却蒸気温度変化試験結果

6. (6) で述べた、高圧ダミー環漏洩蒸気バイパス弁を操作して、中圧入口部ロータ冷却温度を変化させて、ロータのメタル温度が変化することを確認した。高圧ダミー環漏洩蒸気バイパス弁を全閉にするとロータ冷却蒸気温度は高くなる。バイパス弁を開いていくと高圧ダミー環の漏洩蒸気が途中で高圧排気部へバイパスされ、それを補うように高圧排気蒸気が混ざってくるので冷却蒸気の温度が低下する。バイパス弁開度が50%になるとほぼ全開状態になる。バイパス弁全閉から50%開までの変化に対して、冷却蒸気温度は510°Cから450°Cまで変化し、これによってロータ翼溝温度は520°Cから480°C、ロータ中心孔表面温度は502°Cから472°Cまで変化した。

(4) STEP II の伸び差

STEP II ではオーステナイトロータを使用するので伸び差が大きくなることが予想されたが、起動時の過渡的な伸び差は予想したほど小さくなく、定常時の伸び差は予想通りであった。高中圧タービンと低圧タービン間、低圧タービンと発電機間で計測した伸び差を元に推定した各部の伸び差推定値を図28に示す。

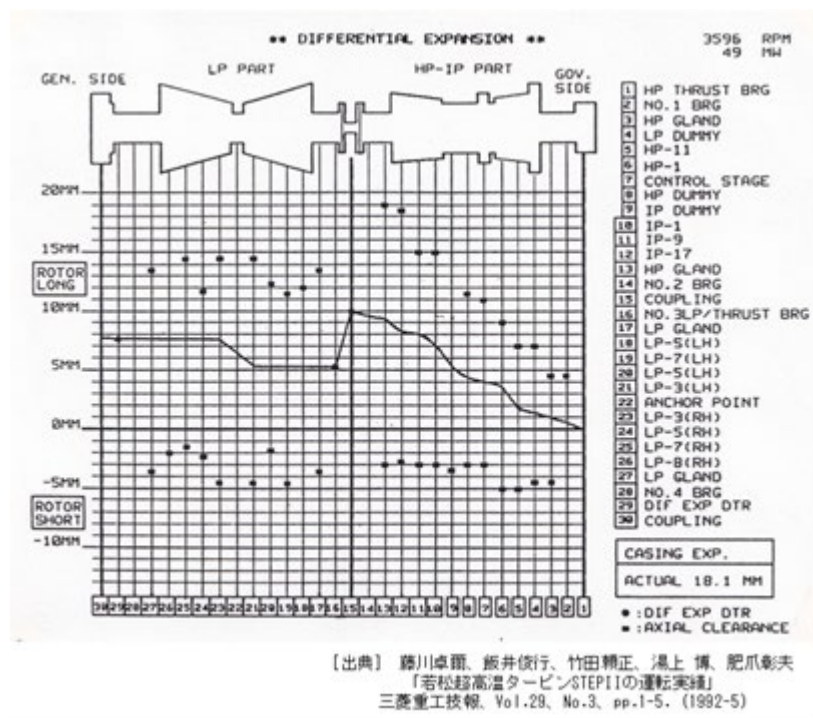


図28 STEP II の伸び差

(5) STEP II の高圧内車室変形防止対策

STEP II ではオーステナイト内車室を使用するので、内外メタル温度差が大きくならないように工夫した。その結果、表3に示すように、STEP I より内外面の蒸

気温度差が大きいにもかかわらず、メタル温度差は小さくなった。

表3 内車室の内外メタル温度差

STEP	STEP I		STEP II	
	蒸気	メタル	蒸気	メタル
内面温度 °C	547	527	613	593
外面温度 °C	414	476	475	571
内外面温度差 °C	133	51	138	22

(6) ボルト応力

STEP I では中圧内車室の締め付けボルトに高温強度の高いオーステナイト系材料を使用した。図29に中圧内車室フランジ温度、ボルト温度、ボルト応力の計測結果を示す。タービン起動と共にフランジ温度、ボルト温度が上昇していく。ボルト応力はこれとともに低下して行った。車室の12Cr鋳鋼は従来の低合金鋼より熱膨張係数が小さく、ボルトは熱膨張係数が大きいオーステナイト系なので熱膨張量の違いによって応力が低下したものである。その後、12Cr系で従来のものより強度が高いボルト材料が開発された。STEP II ではこのボルトを使用した。ボルト応力計測結果を図30に示す。熱膨張係数が同じなので温度が上昇してもボルトが緩まない。

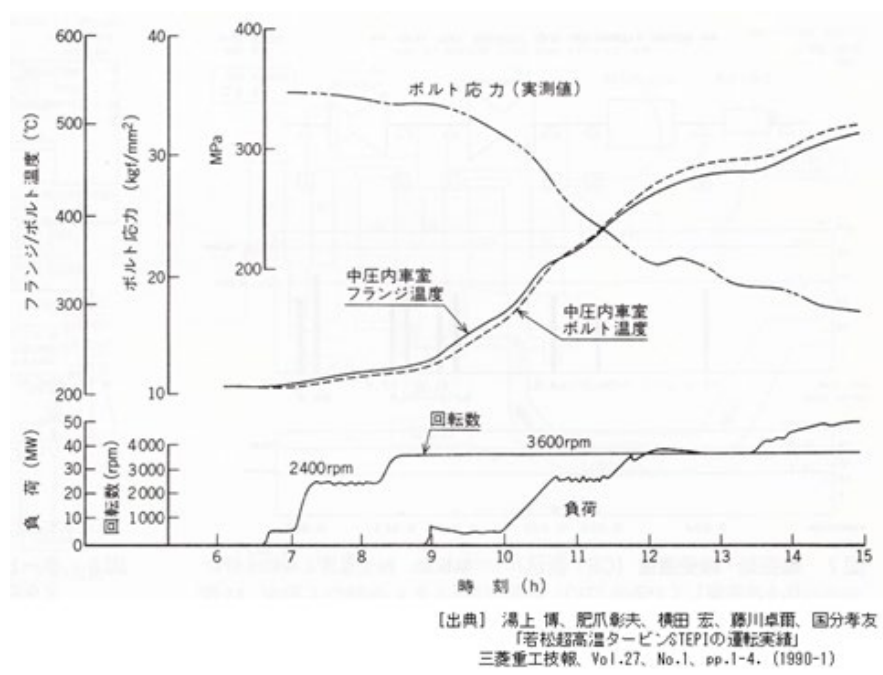


図29 STEP I ボルト応力計測結果

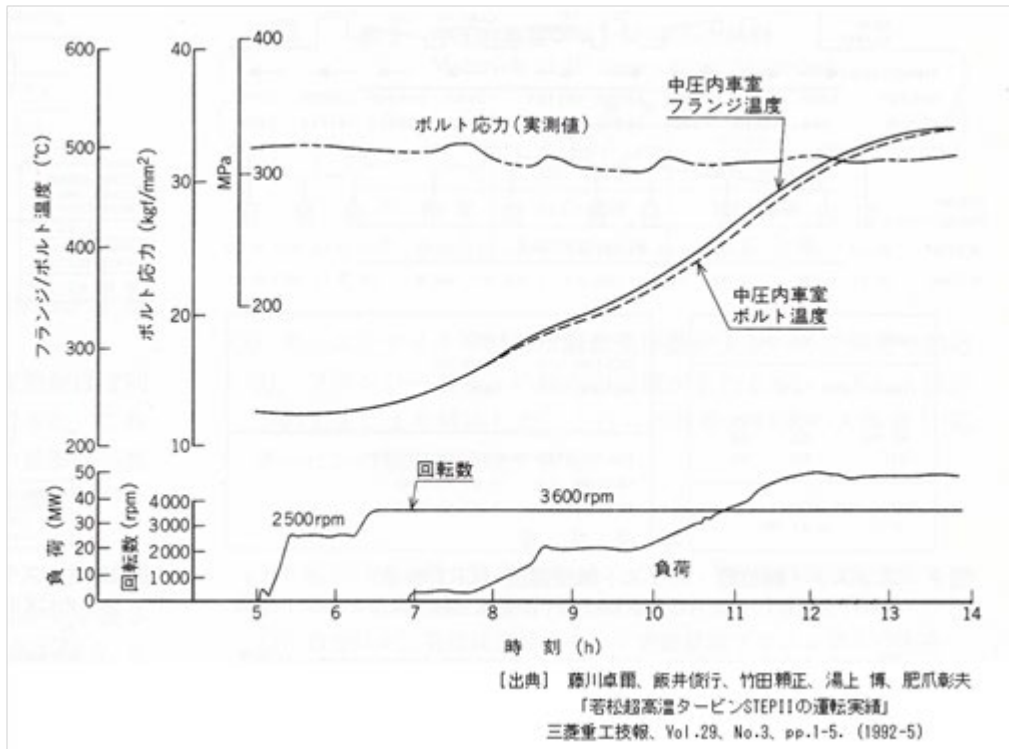


図30 改良型ボルト材料のボルト応力計測結果

(7) ロータ表面温度計測

STEP I の実証試験中、タービン起動時に異常振動が発生した。軸振動ベクトルの変化が接触振動に似ていたが、再現性がなかった。原因究明に苦労した挙句に辿り着いたのがロータ中心孔に水が存在するということであった。ロータ表面温度計測のために中心孔から外面に開けた細い穴の出口部に図22の「ステップⅠ」拡大図に示すようにプラグをネジ込み特殊パッキンで押さえていたが、何回かの起動停止を重ねる間にパッキンが劣化して、タービン起動時にここから蒸気が中心孔に侵入して水になっていた。対策としてプラグの外周部をロータとシール溶接した。

STEP I では12Crロータを採用していたので、シール溶接が可能であったが、STEP II のオーステナイトロータは溶接が難しい材質である。材料の専門家も溶接不可能との見解であった。そこで、STEP II ではロータ表面温度計測ができないことを電源開発（株）に説明することにした。図22の「ステップⅡ」拡大部に示すプラグ部分のモデルを製作して650°Cまで加熱した後に冷水に投入することを20回繰り返して溶接部にクラックが発生すると予想したが発生しなかった。プラグ周りの応力低減用レリーフ溝が効果を発揮したものと考えられる。結局、STEP II で

の1年3ヶ月間の実証運転の期間中連続温度計測が可能となった。

8. 実証試験の成果の商用機への適用

若松超高温タービン実証試験では、商用機では計測していないロータの表面メタル温度を始めとする各部の特殊計測により大容量USCタービンの設計に役立つデータが取得された。実証試験の成果は、その後の大容量商用機に適用された。

中部電力（株）碧南3号機では再熱蒸気温度が従来の566℃から593℃に高められた。北陸電力（株）七尾大田1号機では主蒸気/再熱蒸気温度が従来の538/566℃から566/593℃に高められた。電源開発（株）松浦2号機では従来の538/566℃から593/593℃に高められた。中国電力（株）三隅1号機では従来のft-lb単位系に由来する246kgf/cm²（3500psig）、593/593℃（1100/1100°F）の蒸気条件からメートル単位系の250kgf/cm²、600/600℃とされた。電源開発（株）橘湾1、2号機では主蒸気圧力をSI単位系とし、再熱蒸気温度をさらに10℃上昇して、25MPa、600/610℃とされた。その後、電源開発（株）磯子新3号機では再熱蒸気温度をさらに10℃上昇して、25MPa、600/620℃とされた。令和2年（2020）運転開始の電源開発（株）竹原新1号機では主蒸気圧力、再熱蒸気温度をさらに上昇して、27MPa、600/630℃とされた。この様子を図31に示す。

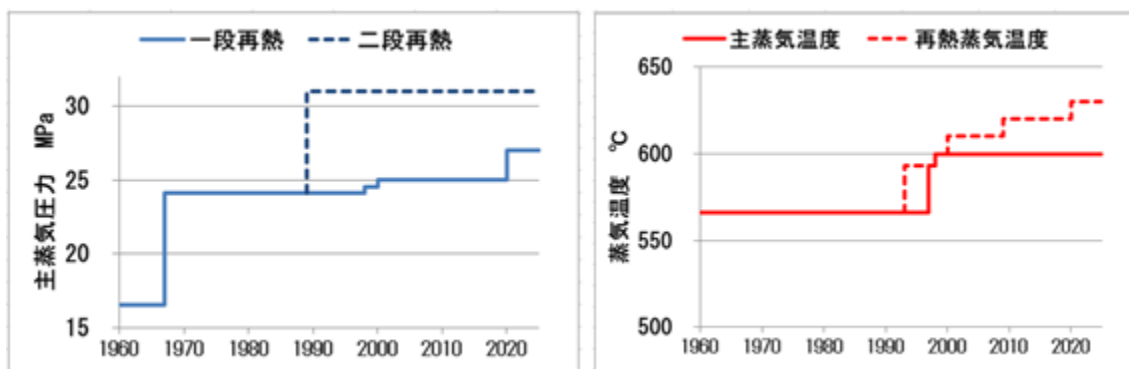


図31 1960年代以降の蒸気条件の変遷

このように、現在の火力発電プラントの蒸気条件は従来の超臨界圧プラントから主蒸気圧力は微増、主蒸気/再熱蒸気温度は600℃/600℃超とするものが定着している。これは、開発初期の大容量USCプラントの目標基本蒸気条件から少しずつれている。その内容と理由については下記の通りである。

(1) 主蒸気圧力が微増に留まっている。

・主蒸気圧力を高めると蒸気の比容積が小さくなり体積流量が減少するので、蒸気通路の面積、すなわち動静翼の高さが小さくなる。回転部と静止部の間の遊隙は体積流量とは無関係に一定なので、体積流量が減少すると、漏洩損失が増大する。従って、圧力上昇による実際の効率上昇は熱力学的な効率上昇より小さくなる。

・主蒸気圧力を高めると圧力容器の肉厚が増加する。ボイラのエコノマイザーから、火炉壁、過熱器、主蒸気管と多くの部分の管厚が増加して材料費が上昇する。

このように、主蒸気圧力増加に対する効率的メリットに比べて材料費上昇のデメリットが大きい。

(2) 再熱蒸気温度は上昇した。

・主蒸気に比べて圧力が低いため圧力容器の肉厚が小さいので、材料高級化による材料費上昇のデメリットが小さく、温度上昇のメリットが大きい。

(3) 一段再熱に留まっている。

・二段再熱による効率的メリットに比べて設備増のデメリットが大きい。石炭焚きの場合は第二段再熱蒸気温度の制御が難しいという課題がある。

その後、さらに高い蒸気温度の700℃を目指したA-USC開発プロジェクトが実施された。また、USC開発開始時点では、「開発にまだ時間を要する」とされていたIGCCも大容量商用機が実現した。このように、火力発電の分野で石炭火力が活躍するための舞台装置は整ってきたが、現在は天然ガスを燃料とするガスタービン複合発電に主役を譲っているように見える。ガスタービンの技術開発の進歩やシェールガスの採掘開始による天然ガスの供給安定化がそれを後押ししていると思われる。石炭は天然ガスに比べてC/H比が高いためCO₂排出量が多いという課題があるが、この点を解決する新技術の開発が期待される。

9. あとがき

1980年代に日本で始まった石炭火力の効率向上の動きは関連する技術の進歩を促し、それまでの30年以上に及ぶ蒸気条件の停滞を打ち破った。近年では従来の超臨界圧発電プラントから主蒸気圧力が微増し、主蒸気/再熱蒸気温度が600℃/600℃超級へ上昇したプラントがUSC(超々臨界圧)の名前で定着している。

筆者は若い頃に超高温蒸気タービンの仕事に参加することができて良かったと思う。

<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、「「日本電力株式会社十年史」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—技術と経済性—」、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)
- (6) A. Hizume, Y. Takeda, H. Yokota, Y. Takano, A. Suzuki, S. Kinoshita, M. Kono, T. Tsuchiyama “An Advanced 12Cr Steel Rotor Applicable to Elevated Steam Temperature 593°C”, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 109, pp. 319-325. (1987-10)
- (7) 池田宣弉、藤川卓爾、竹田頼正、肥爪彰夫、高野正義、木下修司、「蒸気温度 649°C超々臨界圧発電実証試験用改良 A286 鋼ロータの特性」、火力原子力発電、Vol. 43、No. 1、pp. 93-98、(1992-1)
- (8) 古谷春日、肥爪彰夫、藤川卓爾、横田 宏、国分孝友、竹田頼正、「若松超高温タービン実証試験プロジェクト(大容量石炭焚超々臨界圧プラントの実現を目指して)」、日本機械学会論文集(B編)、56巻532号、pp. 303-310. (1990-12)
- (9) 湯上 博、肥爪彰夫、横田 宏、藤川卓爾、国分孝友、「若松超高温タービン STEPI の運転実績」、三菱重工技報、Vol. 27、No. 1、pp. 1-4. (1990-1)
- (10) 藤川卓爾、飯井俊行、竹田頼正、湯上 博、肥爪彰夫、「若松超高温タービン STEPII の運転実績」、三菱重工技報、Vol. 29、No. 3、pp. 1-5. (1992-5)

機械自主研究室について

松久 寛 (S45/1970卒)

機械教室には1970年から数年間、自主研究室があった。1968年にパリをはじめ全世界的に学生運動が発生した。日本にも波及し、1969年に東大、東京教育大学の入試が中止になった。京大も寮闘争から全学に波及した。工学部で問われたのは、戦後（戦前から？）続いてきた講座制の弊害である。

当時の工学部の研究室は、教授、助教授、助手二人、秘書一人に院生と四回生という構成である。講師は教室全体で一人か二人である。研究室によっては、助教授の席を講師にまわしていることもある。助手はよその大学から来て研究と研究室の世話をしている、何年か経ったら教授が他大学に就職の世話をしていた。1960年ぐらいまでは、工学部はどんどん増え続け、機械教室でも、精密工学、機械第二ができた。成長期にはポストも増えたので博士課程を出た人はすぐに助教授か講師になった。しかし、工学部の拡大がストップすると、博士課程を出た人が助手になるようになった。

学生にとっては、ほとんどの科目が必須で一科目でも落としたら卒業できなかった。研究についても同様で、「君、このテーマはどうかね」と。そのうえで「君、この会社はどうや」と薦められて、就職先まで決まってしまう。そうした教授専制システムとして講座が存在していた。そこで、多くの大学、特に工学部では反講座運動が発生した。

私は、1968年は3回生で、前期は普通に授業があったが、後期はストライキなどで、授業はなかった。4回生になれば卒論のために講座に属しなければならないので、仲間たちとどうするか相談していた。自主研究室をつくり、そこで卒論を書けばいいということになった。しかし、自分で卒論をつくる力はとてもなかった。幸い、数人の助教授と講師が協力してくれることになり、何とかなるのではないかと10名で1969年の4月に自主研を設立した。部屋は与えられた。何人かは協力してくれる助教授や講師の指導で卒論を作り、数名は技術論を書いて卒業した。私以外の9名はメーカーや商社に就職した。私は米国のジョージア工科大学の Industrial & Systems Engineering科に進学した。その次の年は十数名が自主研に入った。しかし、その後はだんだんと減り、数年で消滅した。

その後、教室はずいぶんと変化した。たとえば、助教授や講師の地位が向上し、教授とうまくいかなくても独立した研究室を持つことができるようになった。学生は就職先を自分で選ぶようになった。

