

日中科学技術

No. 186

2023. 9. 20

発行所 一般社団法人 日中科学技術交流協会

〒103-0003 東京都中央区日本橋横山町 3-1 横山町ダイカンプラザ 302 号

E-mail : jcstea2019@gmail.com / nagakiya@nifty.com URL : <http://jcst.in.coocan.jp/>

電話 : 03 (3666) 6939 携帯 090-7629-6260

Fax : 03 (3666) 6939

北京四半世紀の思い

当協会理事、原子力安全技術センター顧問、井上育英会理事長、元原研高崎研究所所長
數土幸夫



1. 背景

今からほぼ四半世紀前の 1995 年頃、私は日本原子力研究所 (原研) で原子力に関する伝熱流動の研究開発を 22 年間実施して来ていました。それまでの研究活動状況と当時北京で開催された国際伝熱会議 (ISHT4) に出席した時の体験、さらにはその後のこれまでの思いをご紹介します。筆者にとって ISHT4 は極めて貴重な体験でした。些かでも皆様のご参考になれば幸いです。

(1) 1995 年頃までの私の研究活動

1968 年修士課程在学中、未解明であった原子力安全研究上の喫緊の研究課題「圧縮性二相臨界流の発生機構の解明」を甲藤好郎教授から頂き、研究に着手しました。修士及び博士課程の計 5 年間で、原子炉システムの破断流路から流出する気液二相流の

流量が極大値をとる臨界流の発生機構を理論と実験から明らかにしました。教授の講演に同行した際、途中の水戸市千波湖の環境に惹かれ、博士論文に関連した水戸市に近い東海村の原研に 1973 年就職しました。その年の 2 年前、米国で非常用炉心冷却装置の欠陥問題が起こり、この問題を解決するため我が国でも安全性研究が始まった時期です。加圧水型発電炉で主要配管が地震等で破断した時、もう一度炉心に冷却水を供給し炉心を再冠水させ炉心が冷却されるか、各種の実験と解析を行いました。日米西独三国の国際協力による大型再冠水効果実証試験を推進しました。忘れられないのは、東海研究所で日米西独研究協力会議を開催していた最中に発生した TMI 事故です。国からの委託調査として米国エネルギー省や規制委員会等を訪問し、米国が日本に特段の協力を求めていることを国に報告しました。1979 年から 1980 年にかけて 1 年間、客員研究員として、米国マサチューセッツ工科大学機械工学科で米国原子力規制委員会からの委託研究「Upper Plenum Dump during Reflood」(再冠水時の上部プレナム水の急流下) を Griffith 教授のもとで行いました。

1981年から世界最高レベルの中性子源である研究炉 J R R - 3 M の炉心設計・安全評価を担当しました。低濃縮ウラン燃料を用いる板状燃料炉心での熱伝達特性を実験で明らかにし、事故時に想定すべき下向流、停滞流、上昇流全ての流動形態における熱伝達率特性を熱伝達パッケージとして開発整備しました。内容は、限界熱流束、沸騰開始点、自然/強制対流共存場の熱伝達特性、対向二相流特性など極めて広い領域を対象としています。次いで 1986 年我が国初の高温ガス炉であり、かつ、世界で初めて原子炉の外に 950℃ の高温熱を取り出し、クリーンエネルギーである水素の製造等、多様な熱利用が可能な高温工学試験研究炉 (H T T R) の設計及び国の許認可対応を担当しました。1993 年以降は、伝熱流動研究室長、高温工学部次長として原研の伝熱流動・高温工学に関する先導的基礎研究を立案・実施しました。

(2) それまでの海外、中国との研究協力の関わり

1973 年から 1986 年にかけて、軽水炉及び研究用原子炉の炉心設計と安全解析に関し、二相流工学特に炉心伝熱流動実験解析を通して、米国原子力規制委員会や米国アイダホ、ロスアラモス、オークリッジ各研究所と人材交流や研究協力を行いました。また、高温ガス炉については 1986 年から 1993 にかけて米国、西独、中国特に中国清華大学の高温ガス炉 HTR-10 と HTTR との研究協力を行いました。協力協定の締結・更新、人材交流・派遣が思い出されます。

海外との研究協力を通して、北京で 1996 年 10 月に第 4 回国際伝熱シンポジウム (ISHT4) が予定されていることを知り、これまでの成果の中核をなす限界熱流束についての研究成果を発表することにしました。

2. 第 4 回国際伝熱シンポジウム (ISHT4)

(1) ISHT の組織と経緯

中国清華大学熱科学工学研究所の主催で、国際伝熱シンポジウム第 1 回が 1985 年 9 月 (chaired by Prof. Buxuan Wang, Tsinghua University) に行われ、その後 4 年毎に清華大学主催で開催されることになりました。第 9 回は 2016 年 8 月、15 か国・地域から 150 名の参加者で行われ、これまで 31 年間で計 9 回の国際会議が行われました。残念ながら 2020 年 7 月に予定された最新の第 10 回は、コロナ禍で延期されています。

(2) プログラムの特徴

ISHT4 は、連日晴天続きの正に北京秋天下の 1996 年 10 月 7-11 日の 5 日間開催されました。伝熱流動全分野を 10 領域に分けたプログラム構成に対し、24 か国から 250 論文が投稿され、査読を通過した 114 論文と 10 招待講演で構成されました。ISHT4 プログラムの概要を、Fig.1 に示します。中国からは 4 招待講演と 82 論文、日本からは 2 招待講演と 11 論文となっています。

論文集はハードカバー全 812 頁の製本 Higher Education Press 刊行で、タイトルは “Heat Transfer Science and Technology 1996 edited by Prof. Wang Buxuan, Director, Institute for Thermal Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing, China” で、会議参加者全員に配布されました。筆者の論文タイトルは、Analytical study on characteristics of critical Heat Flux in saturated two-phase flow under zero to comparatively low mass velocity in vertical heated channel で、

Fig.1 のプログラム(9b)沸騰熱伝達で発表しました。従来の高濃縮ウランではなく、低濃縮ウラン板状燃料を用いる研究用原子炉の炉心熱流動・安全解析用熱伝達の提案に関するものです。限界熱流束の評価には、流路形状、流動パターンを考慮すべき

こと、流路形状を代表長さとした無次元数の役割等を紹介しています。

(3) 会議支援と北京の状況

会議は、清華大学中央に位置する大講堂で行われ、宿泊施設は清華大学内のゲストハウスでした。宿泊部屋は個室で、食事は朝昼夕ゲストハウス内の食堂で供されました。会議開催中自由に大学構内を散策することができました。HTR-10 の訪問も行いました。会議終了後の夜には、京劇の観劇などが用意されていました。最終日には、明王朝遺跡、万里の長城（八達嶺）訪問が希望者を対象に行われ、筆者も参加いたしました。会議場の清華大学が近接していることから、天安門広場、紫禁城、北京市内の見学・散歩を行うことができました。北京市内は、極めて穏やかで当時は高い建物はほとんど見受けられず、市内全体が整備中という感じがしました。国際会議を通して、中国の歴史を体感することができました。会議の運営については、関係者の気配りが随所に感じられました。

3. その後の活動と今振り返り思うこと

その後企画室に異動し企画室長を経て2001年大洗研究所長となり、核熱を利用したクリーンエネルギーである水素を製造する核熱利用技術研究を推進しました。同年HTRの850°C定格運転、次いで950°C高温運転に成功しています。2002年高崎研究所長に就任してからは、これまでの研究活動を通し蓄積した知見を基に、原子力はエネルギー利用だけでなく放射線利用とあわせ、極めて国民生活に密着した有用なものであり、無限の可能性と多様性を有することを、大学、学協会、各種委員会、ロータリークラブ等の市民団体で説明し、研究成果の技術移転や科学技術の普及に努めました。

今振り返ってみますと、特に忘れられないのが上述の北京での国際会議です。筆者に伝熱流動というよりは二相流工学の展開の意義と真髓に目覚めるきっかけを与えてくれたという意味で、極めて意義深いものでした。現在会議開催が中断されているようですが、「継続は力なり」です。国際的にもコロナに負けず、今後国際会議の早急の再開・継続が切に望まれます。

Fig. 1 ISHT4プログラムの概要					
	10月7日(月)	10月8日(火)	10月 日(水)	10月10日(木)	10月11日(金)
7:00		朝食	朝食	朝食	朝食
8:30		基調講演	基調講演	基調講演	
10:30	登録受付	(1)熱伝導	(5a)熱伝達促進	(8a)ミクロ熱伝達	
—11:50	清華大学	(2a)対流現象	(6a)熱物質プロセス	(9a)沸騰熱伝達	
	ゲストハウス	(3a)多孔質熱伝導		(10a)数値熱伝達	
2:00		(2b)対流現象	(5b)熱伝達促進	(8b)ミクロ熱伝達	
—5:30	開会式	(3b)多孔質熱伝導	(6b)熱物質プロセス	(9b)沸騰熱伝達	見学
		(4)輻射と燃焼	(7)境界分野	(10b)数値熱伝達	
	基調講演			3:30 基調講演	
				閉会式	
6:30	夕食	夕食	夕食	晩餐会	

Fig.1 ISHT4プログラムの概要

郭沫若さんと于立羣さんとの対の漢詩

協会理事、茨城大学名誉教授、公益財団法人倶進会常務理事 坂田文彦

1 序

今年の3月半ば、久しぶりに郭平英さん(郭沫若さんと三番目の妻・于立羣さんとの末娘で郭沫若記念館の前館長)から電子メールが届いた。この十数年電子メールで新年の挨拶を交わしてきたが、今年は届かなかったのが気にはしていたが、彼女が使っていたメールソフトを新しくしたとき、私のメールアドレスを失くしてしまったせいだった。そのとき郭平英さんが「方志四川」という四川省刊行の雑誌に書いた“**科学与和平拓展 新天地—記郭沫若与坂田昌一先生的友情**”という文章の電子版のURLを知らせてきた。時を同じくして棚橋誠治さん(名古屋大学教授)から、藤田梨那さん(国士舘大学教授:郭沫若さんと二番目の妻・佐藤をとみさんとの孫娘)が資料調査のために名古屋大学坂田記念史料室に訪問されたとの電子メールを受け、藤田さんが(叔母に当たる郭平英さんから既に得ていた)前掲文書を日本語に訳し、棚橋さんに渡されたpdf版が添付されていた。

郭平英さんは私より二才ばかり若く、同じ時代を其々日本と中国から観てきたが、彼女の文書をもとに(それには戦後の日中科学交流に関して若干の誤りもあった)、郭沫若さんと于立羣さんから母が頂いた対の漢詩にいたるまでの話を、藤田梨那さんの訳を交えて私なりに纏めてみることにした。

2 郭沫若さんの想い

郭沫若さんの日本との関係は、旧来の婚姻制度によって結婚をさせられたことに反発、1914年の日本留学に始まる。九州帝国大学医学部を卒業後中国に戻り国民党に参加するが、次第に蒋介石と意見を異にし、国民党からの追及を逃れて1928年日本に亡命、市川で日本の警察の監視の下での生活を余儀なくされた。1937年の盧溝

橋事件を知ると秘かに中国に戻り、抗日運動に参加、新中国の建設に加わった。

郭沫若さんの公的な日中科学交流は1955年5月に日本学術会議会長(東京大学教授)茅誠司氏を団長とする学術代表団がソ連と中国を歴訪し、帰国直後茅誠司氏は中国学術代表団の招待を計画、同年秋には郭沫若さん(中国科学院院長)を団長とする中国科学院学術代表団の訪日を実現させた事に始まる*1。

*1 1952年学術会議総会は、戦後欧米との国際交流はますます盛んになっていったにもかかわらず、ソ連や中国など社会主義国との交流は杜絶した状態にあり、学問の健全な発展のためには全世界的な交流が必要であるという観点から、福島要一(農林省)氏、伏見康治(大阪大学教授)氏等の提案による“ソ連、中国との学術交流を促進する決議”を可決。同年「ソビエト連邦および中華人民共和国と学術交流の途を開くことについて」という要望を政府・内閣総理大臣吉田茂に提出。(参照:坂田昌一、『科学者と社会』論集2, 347頁、岩波書店1972年)

このとき郭沫若さんは蘇歩青(復旦大学教授)、葛庭燧(清華大学教授)両氏を伴って京都大学基礎物理学研究所を訪れており、初めて湯川秀樹(京都大学教授)氏や父と出会った。

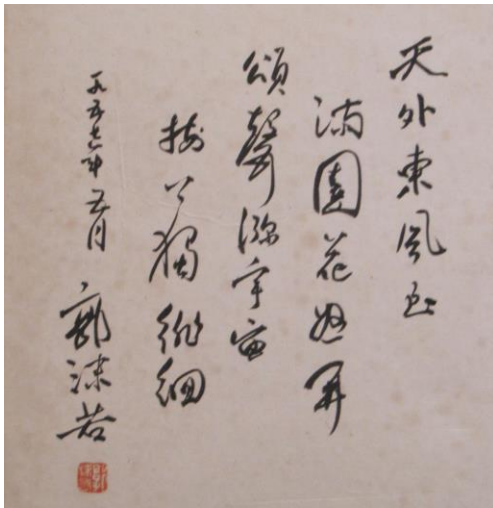
翌1956年、父はストックホルムで開かれた世界平和評議会特別委員会に出席した後、ソ連科学アカデミーの招待で3週間ソ連に滞在し、レーニンград大学、モスクワ大学、レベデフ研究所やドゥブナ原子核研究所などを訪れた。モスクワに滞在中、郭沫若さんから中国科学院への招待状を受取った父は、中国で有効な旅券を持たずに、モスクワから空路北京へと向かった。数週間の北京滞在を終えたとき、父は郭沫若さ

んから湯川秀樹、朝永振一郎(東京教育大学教授)、菊池正士(大阪大学教授) を含む十数人の日本物理学者に宛てた招待状を託かり、帰国した。翌1957年朝永振一郎氏を団長とする訪中団が北京に向かった。このとき原子力委員会の委員だった湯川秀樹氏の訪中に政府は難色を示し、また前年有効な旅券を持たずに中国に入国した父には“国家公務員の服務規定に違反した恐れがある”との判断から旅券が交付されなかった。このとき郭沫若さんは

父への想いを五言絶句

天外東風至
満園花怒開
頌聲瀟宇宙
楼上獨徘徊

一九五七年五月 郭沫若



日本語訳

天外より東風が至り
庭一杯に花が咲き誇る
称賛の声が宇宙を満たし
楼上を独り徘徊する

一九五七年五月郭沫若

を色紙に記し、父に届けてほしいと訪中団に託した。藤田梨那さんによれば、

日本の新鋭な学者団体が東の方からやってきた。

各国の学者が一堂に会し、花がいっぱい咲いたようだ。

歓声が天まで響くが

私はここにいない友人を思い、一人楼上で徘徊している。

とも解釈できるとのこと。

3 惜別の辞

1967年頃から腰痛などに悩まされていた父は、治癒が見込めない多発性骨髄腫であることを知らされず、放射線治療などを行って闘病生活を送っていたが、西洋医学の限界を感じつつ、長い歴史を持つ中国医療・漢方薬治療にも頼ろうと、父と母は有山兼孝(名古屋大学教授)氏*

*2 本協会の前理事長有山正孝教授の父上。1957年の訪中団の副団長として参加され、それ以降の“日中両国物理学界の学術交流に関する覚え書”を有山兼孝副団長と周培源中国物理学会理事長との間で作成。(朝永団長は先に帰国され、有山副団長が代わって署名。“周・有山メモランダム”と呼ばれている。)

をお願いして、郭沫若さん宛に漢方薬を紹介して頂きたい旨の手紙を書いて頂いた。郭沫若さんは直ぐに科学院外事部を通じて広安門病院に指示を出されたが、日本に処方箋を送るにも多くの困難があったことが郭平英さんの文書によって初めて知らされたのであった。1970年1月有山兼孝氏から1年間の漢方薬の補助治療により、父の病状が或る程度緩解したという報告が郭沫若さんに届き、その日のうちに周恩来総理に報告され、科学院衛生部に新しい適切な治療方法の出すように提案、周恩来総理の“迅速な処理”の同意を取り付け、第二の処方箋が前回よりずっと円滑に日本に向け発送された。

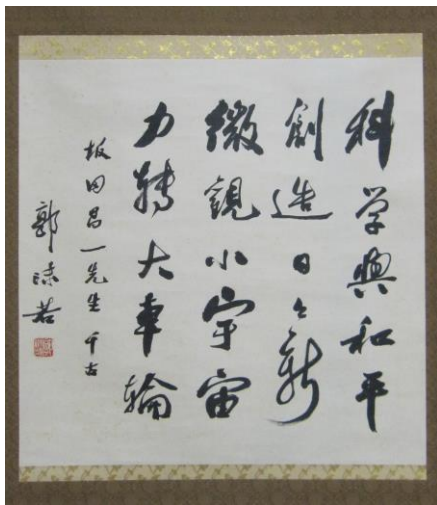
二番目の漢方薬について、有山兼孝氏は免疫力の回復に効果があったことや、郭沫

若さんの励ましの手紙が精神的支えになったことなどを郭沫若さんに丁寧な報告された。1970年9月父の病状悪化が北京に伝わると、郭沫若さんは直ぐにお見舞いの電報を父に打ち、父も10月6日に最後の思考活動となった返電を打ったのち、昏睡状態に陥った。

1970年10月16日に父が亡くなって以降の母と郭沫若さんとの手紙の遣り取りを、中国側が克明に記録していた事を、今回の郭平英さんのメールに添付された文書と資料から初めて知らされた。郭沫若さんは母からの求めに応じて父の墓碑に彫る為の五言絶句を創し、その墨蹟を送って来られた：

科学与和平
創造日々新
微觀小宇宙
力轉大車輪

坂田昌一先生 千古 郭沫若



郭平英さんは、“前二句の「科学」「和平」「創造」「日新」は坂田教授が終生奮闘努力したモットーであり、これは郭沫若と坂田昌一の思想的共鳴であるし、また良知ある科学者たちに共通する使命でもある。

後二句は文学的表現によって、坂田教授が理論物理学研究で応用していた弁証法を解釈したものである。すなわち、微視と巨視、空間と時間は対立しながら統一する考え方である”との解釈をのべている。

父は亡くなる前年の1969年「私の古典」*3

*3 坂田昌一、『物理学と方法』論集1, 398頁、岩波書店1972年

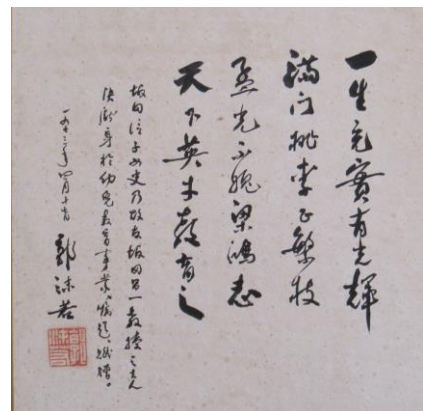
というNHKの番組で、自分の人生について、エンゲルスの“自然弁証法”が如何に大きな役割を果たしてきたかを語っている。その人生を僅か20文字の五言絶句にまとめあげた郭沫若さんの卓越した文学的能力に感心するばかりでなく、本当に父を深く理解して下さっていた証だと感じ入るばかりである。

4 母への一対の詩

郭平英さんは続けて“昌一は重病の間も郭沫若さんとの友情を片時も忘れず、病気が治ったら一緒に北京に行き、郭沫若さんに会わせると何度も私に話した・・・”と郭沫若さん宛の母からの手紙の内容の一部を紹介し、1973年に中国科学院の招待で、“母は郭沫若さんに会うことが出来た”との文章につなげている。

1972年9月に中華人民共和国との国交がようやく正常化される中で、1973年4月母は有山兼孝夫妻などと共に中国科学院の招待で北京を訪れ、郭沫若さんの家族、于立羣夫人と、その子供達、郭漢英、郭庶英、郭平英さんとの親交を深める機会を与えられ、更に郭沫若夫妻による七言絶句と五言絶句の一対の墨書を頂いた。

郭沫若さんの詩



一生充実有光輝
 滿門桃李正繁枝
 孟光不愧梁鴻志
 天下英才教育之

園中宜種樹
 最好是梧桐
 葉落日常在
 冬來不覺冬

坂田信子女史乃故友坂田昌一教授之夫人、
 決獻身于幼兒教育事業、囑題賦贈
 一九七三年四月十七日 郭沫若

坂田信子夫人囑書李賀「莫種樹」、今反其
 意成「宜種樹」一首以應
 一九七三年四月十七日於北京于立羣

藤田莉那さんによる日本語訳

藤田莉那さんによる日本語訳

坂田先生の一生は充実して輝きがある。先生の教え子たちは桃李のように天下に満ちている。
 孟光(信子夫人)は梁鴻(坂田先生)の志にはじることなく天下の英才を育て上げていく。*

庭には木を植えるによし、梧桐は最もよし
 落葉しても日はながし、冬来ても冬と感じ
 ない

※ 漢の時代、富豪の孟家に娘がいた。名を光という。彼女は数々の求婚者を断っている。父がその理由を尋ねると、梁鴻なる者は徳が高い。その方に嫁ぎたいという。孟光は木綿の粗末な服を作り、梁鴻と結婚した。その後、梁鴻が山に隠遁したいという志を懐いているのを知って、粗衣を身にまとい共に山奥に入った。質素な生活をしなくても、孟光は食事の時必ず食膳を眉まで高く上げて梁鴻に給したという。

坂田信子夫人に李賀「莫種樹」の書を依頼されたが、いま「莫種樹」の意に反し、「宜種樹」一首を詠んで、もってこれに応じる。
 一九七三年四月十七日北京において于立羣

『後漢書梁鴻伝』

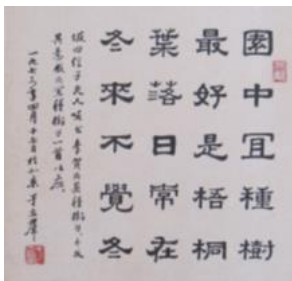
藤田莉那さんは次のような解説を付けてくださっています：

坂田信子女史は今なき友人坂田昌一教授の夫人である。幼児教育事業に身を捧げると決意している

信子夫人は最初、李賀の「莫種樹」を依頼したようです。唐代の薄命詩人李賀はその詩において重い「愁い」を詠んでいます。于立羣は逆に木を植えていいという「宜種樹」を創作して書にしました。梧桐は南方の木で大きな葉を持ちます。冬は落葉します。一般的に落葉は死を暗示し、悲しい気持ちを引き出します。しかし、于立羣は、落葉しても逆に太陽が容易に木の間から差し込み、暖かく感じさせ、冬を忘れさせてくれると、詩の後半二句で詠んでいます。つまり、ポジティブな捉え方をしています。また、人材を育てることは「木を植える」、「樹人」とも表現します。ここで、郭沫若の詩と呼応して、幼児教育の道に進もうとする信子夫人を励ましています。

これに詩を賦して贈る
 一九七三年四月十七日郭沫若

于立羣さんの詩



5 終りに

父の訪中は1956年と1964年の2回だけであつたが、父が多発性骨髄腫で1970年に亡くなるまでの間、多くの人々が情熱を傾けながら幾多の困難を乗り越え進めてきた、国交のない時代の日中文化交流--それは

一方で、西欧の帝国主義、植民地主義、軍国主義に翻弄され、長い間封建制度から脱却出来ずにいた中国の独立を取り戻し、新生中国を創り上げるために動き始めた多くの中国の人々と、

他方で、倒幕・維新を経た後、西欧の帝国主義、植民地主義、軍国主義に倣い、日露戦争後のポーツマス条約で大陸進出への足がかりを得た日本政府は、南満洲鉄道設立、関東軍設置そして、日中戦争、太平洋戦争へと突き進み、最終的に1945年無条件降伏を受け入れた荒廃した日本を、自由で平和で民主的な国に創りあげようと動き始めた多くの日本の人々とが、

国の体制を越え、民族の違いを超え、貧しくても、明るい未来を創り上げるために懸命に働いていた時代背景の中で進められた日中文化交流--で支えられ、育まれた郭沫若さんと父との友情を、多くの残された手紙や書跡をもとに書き綴って下さった郭平英さんと、それを日本語に訳して下さった藤田梨那さんに敬意を表したい。

特に母は父を亡くした後、郭沫若さんとの遣り取りで心から慰められ、其の後30年近くも元気に幼児教育に携わった人生を歩めたこと、また郭沫若さんにとっても父への友人としての想いが母との遣り取りで一層深められたと私には思われる。

私が初めて中国を訪れたのは、中国科学院理論物理研究所の院士・戴元本教授の招聘により約一カ月間中国に滞在した1985年10月だった。その時父を知る中国科学院の嚴濟慈氏、崔泰山氏に人民大会堂で歓待を受け、それ以降COVID-19のパンデミックが起こる前までの約30年間、殆ど毎年共同研究のために訪中し、多くの中国人研究者や中国科学院の方々とも懇意になった。しかし郭平英さんの文書を私なりにまとめ直し、色々なことを調べているうちに、郭沫若さんと于立羣さんは1978年にお亡くなりになっていることを知り、もう7年早く北京を訪れていればお二人にお目に掛れたのにと、今更ながら残念に思えてならない。

高温材料強度研究との関わりから考える中国

協会監事、物質・材料研究機構名誉研究員、北京科技大学・国家材料服役安全科学中心高級顧問
八木 晃一

はじめに

「日中科学技術 No. 163 (2017. 12. 20)」に「中国における USC 発電プラントの状況と課題」と題して、中国における USC 発電プラントの状況、USC 発電プラントで使用されている材料の課題、プラント寿命評価のための研究活動の状況、中国における材料試験技術の標準化活動などを書かせていただいた。今回は、前回に書かせていただいた以後の USC 発電プラントの状況を報告するとともに、中国と関わってきた高温材料強度研究を通じて、中国とはどのような国であるかを小生なりに考えてみた。ただし、ここで書かせていただいた内容は、あくまでも小生の狭く、浅い経験に基づいた私見であることをお断りします。

中国における USC 石炭火力発電プラントの状況

火力発電プラントとは、石炭、石油、ガスなどの燃料を燃やし、その熱によって高温・高圧の蒸気を得、その蒸気

で発電タービンを回転させ、タービンに接続した発電機で電気を起こす装置である。火力発電プラントの効率は蒸気の温度と圧力の上昇とともに向上する。このため、高効率の火力発電プラントを得るには、高温・高圧の蒸気を作り出すために高温・高圧の条件に耐え、高温・高圧蒸気を安全に活用できるプラント構造部材が必要である。蒸気条件は温度と圧力によって、亜臨界圧、超臨界圧 (Super Critical, SC)、超々臨界圧 (Ultra Super Critical, USC) と呼ばれ、それぞれの蒸気条件での温度および圧力を表 1 に示す。各蒸気条件で得られる効率は、亜臨界圧で ~40%、超臨界圧で 40~42%、超々臨界圧で 41~43% である。

高温・高圧の蒸気を得るためには、その蒸気条件に耐えられるボイラ配管用の材料が必要である。このことから、蒸気条件を上昇させるために、各種の耐熱鋼の開発が進められてきており、USC 発電プラントでは配管用として高クロム (Cr) 鋼が使用されている。

表 1 亜臨界圧、超臨界圧 (SC)、超々臨界圧 (USC) の圧力と温度

	主蒸気圧、MPa	主蒸気温度、°C	再熱蒸気温度、°C
亜臨界圧	< 22.1	< 565	< 565
超臨界圧(SC)	22.1 - 25	540 - 580	540 - 580
超々臨界圧(USC)	> 25	> 580	> 580

中国における最初の USC 発電プラントは、中国華能集団の玉環発電所の 4 ユニット (容量; 1000MW、製造; 上海電気) で、運転開始は 2006 年 11 月である¹⁾。USC 発電プラントは最初に米国と

英国で 1960 年代に運転されているが、これらのプラントは研究的なものであって、実用として世界で初めて運転された USC 発電プラントはわが国の碧南発電所 3 号機である。中国での UCS 発電

プラントの初号機の運転開始は 2006 年であり、世界で 3 番目であって、中国の USC 発電プラントの運用は世界の中で早いグループに入る²⁾。

表 2 は中国における 600℃・USC 発電プラントの設置数を示す。この表は、中国鋼鉄研究総院 (CISRI) の Dr. Zhengdong Liu さんが 2018 年 10 月に北京で開催された 9Cr 鋼の国際会議で講演したときの情報である³⁾。この時点での中国の USC 火力発電プラントの発電量は世界の約 90%であるとのことである⁴⁾。

表 2 中国における 600℃・USC 発電プラントの設置数

年	年間設置数	総設置数
2006	3	3
2007	4	7
2008	4	11
2009	9	20
2010	13	33
2011	13	46
2012	12	58
2013	5	63
2014	7	70
2015	12	82
2016	15	97
2017	5	102

中国では、2020 年に脱炭素化規制によって、石炭価格が高騰し、石炭火力発電会社はいずれも巨額の損失を被り、同時に政府によって電力供給価格が凍結された。このため中国における石炭火力発電プラントの新たな建設は 2020 年から 2022 年の間、保留された。しかしながら、2022 年に状況が変わり、中国政府は、増大するエネルギー需要を満たすために、新しい先進的な石炭火力 A-USC 発電プラントの建設を奨励した。そして、政府の許可のもとで、石炭の供給量が増加し、石炭の価格が劇

的に下がった⁴⁾。

表 2 は 2017 年までの 600℃・USC 石炭火力発電プラントの設置数を示しているが、2023 年 4 月の Dr. Liu さんの情報によれば、中国における 600℃・USC 発電プラントおよび A-USC 発電プラント（蒸気温度；600℃～620℃）の 2018 年度末での建設数は 320 基で、その内、約 240 基は運転中とのことである。なお、A-USC 発電プラント（蒸気温度；600℃～620℃）は 1000MW で、160 基建設されたとのことである⁴⁾。

中国政府は数年前から効率が低く、小型の火力発電プラントを停止するという厳しい政策をとってきている。このため、新しい火力発電プラントにおいても非常に厳しい排出制限を満たすことが必要であり、この規制は米国、欧州や日本よりも厳しいものである⁴⁾。数年前、北京に近づくとも飛行機の窓からスモッグで煙った町の景色が見られたが、低効率の火力発電所や暖房用のボイラが運転停止になり、北京の街での空気がきれいになり、政策変更が身近に感じられた。

A-USC 石炭火力発電プラントの開発

より高温の蒸気条件での発電プラントを製造できれば、より高効率の発電プラントが得られ、炭酸ガスの排出を低減することができる。このため、CISRI の Dr. Liu さんはより高温での USC 火力発電プラントに使用できる G115 鋼 (9%Cr-2.8%W-3%Co-1%Cu) を開発した。G115 鋼と P92 鋼（中国の USC 発電プラントで使用されている）のクリープ強度の比較を図 1 に示す。この図から、G115 鋼のクリープ強度は P92 鋼のクリープ強度よりも優れていることが分かる。このことから、世界で最初の 630℃・A-USC 石炭火力発電プラントに採用されることになり、大径鋼管の開発研究が 2016 年ごろから始まった。しかしながら、USC 発電プラントの状況で述べたように、この A-USC 石炭火力

プラントの開発も一時停滞した。しかし、2022 年の始め頃から状況が変わり、中国政府は、増大するエネルギー需要を満たすために、新しい先進的な石炭火力 A-USC 発電プラントの建設が奨励されることになった。そして、2022 年 5 月に、2 基の 1000MW・A-USC 発電プラントの建設が開始されることが大唐国際発電会社の代表によって正式に発表された。2 基の A-USC 発電プラントは 2025 年ごろに完成し、運用される予定である⁴⁾。

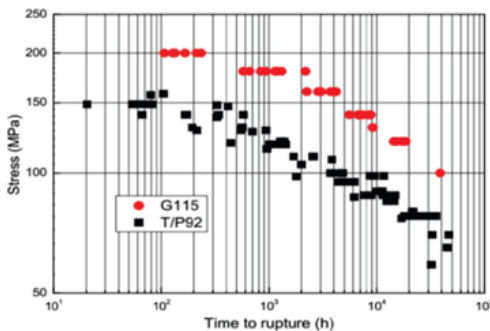


図1 G115 鋼と T/P92 鋼のクリープ強度の比較

USC 発電プラントに使用されている P92 鋼の状況

中国の USC 発電プラントの技術は欧

州およびわが国の企業から導入されたが、主蒸気管などのパイプ材には主として P92 鋼が使用されている。P92 鋼は P91 鋼よりもクリープ強度が高く、設計許容応力は高い。このため、配管の肉厚を薄くでき、発生する熱応力を低減させることが期待できる。しかし、P92 鋼のクリープ破断延性は高温・長時間条件で大きく低下し、その低下の度合いは P91 鋼よりも大きい。

各国の USC 火力発電プラントで使用されている P92 鋼の状況を専門家に尋ねた。600°C で P92 鋼を使用している欧州での最初の USC 発電プラントはイタリアの Torrevaldaliga 発電所 (2008 年に運転開始) であるが、損傷の報告はなく、100,000hr 近く使用されているとのことである⁵⁾。ドイツの Mannheim 9 の USC 発電プラントは 2014 年の運転開始から 30,000hr を超えて運転されているが、使用されている P92 鋼に問題は生じていないとのことである⁶⁾。また、日本での USC 発電プラントの多くは P91 鋼が使用されているが、一部のプラントで P92 鋼が使用されている。使用されている P92 鋼についての損傷は報告されていないとのことである。中国における USC 発電プラントで使用されている P92 鋼について問題は発生していないとのことである⁷⁾。

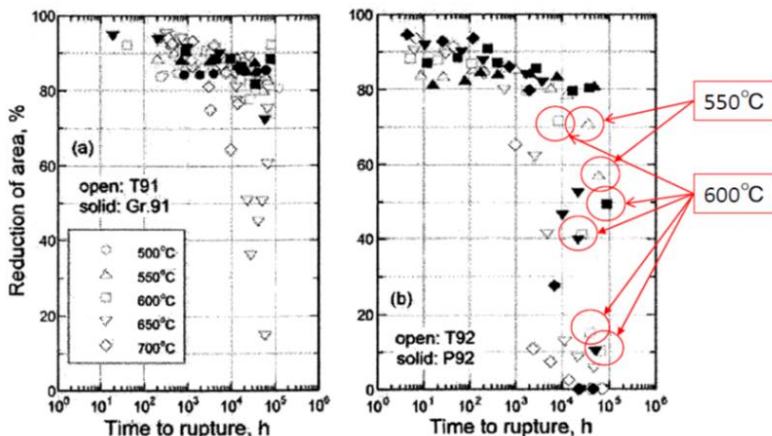


図2 T/P91 鋼と T/P92 鋼のクリープ破断試験から得られた断面減少率

図2は、T/P91鋼およびT/P92鋼についてクリープ破断試験を行い、得られた断面減少率（破断絞り）を示す⁸⁾。T/P91鋼では650℃以上の長時間試験で断面減少率の低下がみられるが、T/P92鋼では550℃、600℃の長時間側で断面減少率の低下が認められる。つまり、P92鋼はクリープ強度がP91鋼と比較して高く、より高圧力に耐えることができるが、P92鋼を長期間安全に使用するためには、破断延性の低下を十分に検討することが必要であることを示している。

破断延性の低下は、疲労強度に影響する。また、高温・長時間使用によって、パイプとパイプを接続した溶接部で円周方向の破壊（ギロチン破断）が起こる可能性があることが示唆されている⁹⁾。このため、T/P92鋼を使用する場合には、溶接強度も課題である。

USC 発電プラント寿命評価のための P92 鋼の課題

火力発電プラントの役割は従来のような基盤電力源としてだけでなく、環境変化に影響を受ける太陽光や風力などの再生可能エネルギー源に対する補助電源としての役割も果たすことが求められる。図3は、1日での太陽光からのエネルギーが供給できる時間帯と供給できない時間帯での再生可能エネルギー源（太陽光、水力）からの電力の供給量と火力発電プラントからの供給量の変化を示す¹⁰⁾。中国は広い国土を有しており、スマートグリッドの活用によって再生可能エネルギー源の供給を適切に制御できれば、電力供給は日本よりも気候変化による再生可能エネルギー源の変動の影響を受けにくいのではないかと想像される。しかしながら、全ての電力需要を再生可能エネルギーで補うことは無理であり、電力安定供給のためには補助電源としての火力発電プラントの役割は重要であり、常に電力需要に応えられるよう供給の体制を整えておくことが必要である。

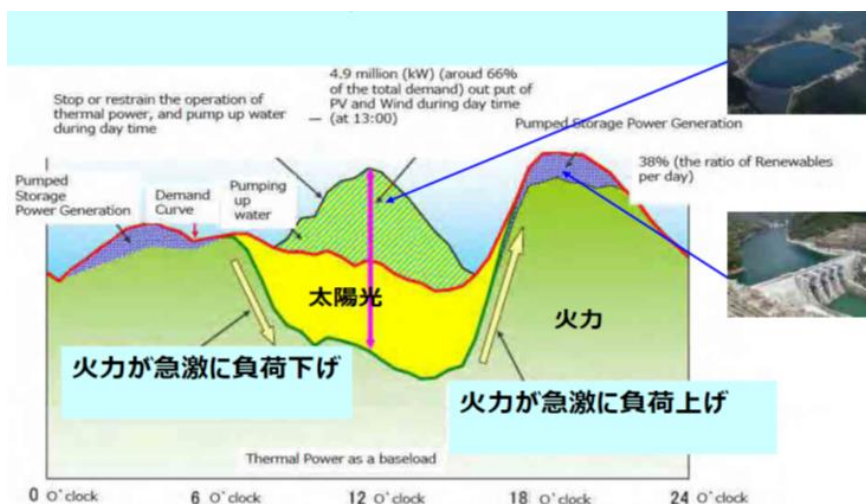


図3 火力発電量に及ぼす再生可能エネルギー（太陽光、風力）供給変動の影響

高温構造部材に作用する荷重や温度に変動が生じた場合、変動によって局部的に応力が発生する。すなわち、機器の起動停止によって構造部材は繰返

し荷重による疲労損傷を受ける。高温構造部材では、通常、高温下での運用中の負荷によってクリープ損傷を受ける。このため、荷重および温度変動を

受ける部材の寿命評価では、クリープ損傷と疲労損傷の両影響を考慮することが必要である。一般に、クリープ・疲労相互作用の研究では、図 4 に示すような、引張ひずみ保持疲労試験が用いられる。

ひずみ保持時間中の応力はクリープ変形によって緩和し、疲労寿命は低下する。しかしながら、P91 鋼や P92 鋼のような高 Cr 鋼の場合、応力緩和量が大きく、保持時間中の応力が低くなり、ひずみ保持中に生じるクリープ損傷量は小さい¹¹⁾。

このため、大きなクリープ損傷量を負荷できるクリープ・疲労相互作用の研究がドイツ、中国で提案されている。

筆者は、若いころ、クリープ荷重と疲労荷重を交互に繰り返すクリープ疲労複合荷重試験法を用いて、クリープ疲労相互作用に及ぼすクリープ損傷様式の影響を研究した¹²⁾。図 5 は低合

金鋼、オーステナイト鋼など各種の耐熱鋼を用いて行ったクリープ疲労複合試験から得られた破壊までに蓄積されたクリープ損傷量 (ϕc)・疲労損傷量 (ϕf) 関係とクリープ破壊様式との関係を模式的に示す。 ϕc vs. ϕf 関係はクリープ破壊様式に依存している。小生の研究成果を考慮すると、P92 鋼についてはクリープ疲労相互作用の研究を進めるとともに、その基盤として P92 鋼についての長時間クリープ試験を実施し、クリープ変形挙動、クリープ損傷、金属組織変化、クリープ寿命、クリープ破壊様式などの基盤研究を進めることが重要であると考えている。クリープ挙動は、金属材料に含まれる微量な元素、鋼材製造中の機械加工や熱処理、また製品製造中の溶接など、様々な因子の影響を受ける。そのため、地道であるが、粘り強いクリープに関する基盤研究活動を続けることが求められる。

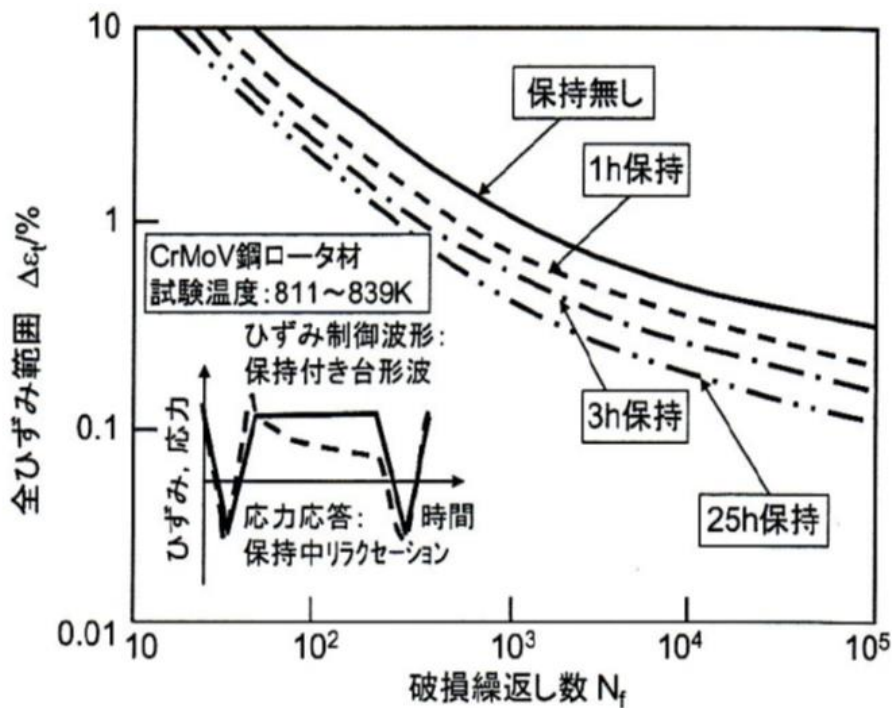


図 4 引張ひずみ疲労試験による試験結果

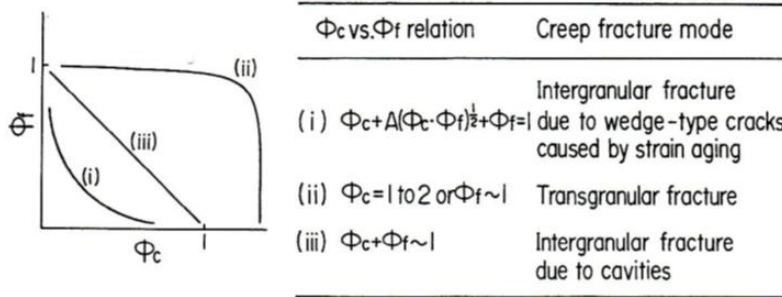


図 5 クリープ疲労複合荷重試験から得られたクリープ疲労相互作用のクリープ破壊様式の依存性

No. 163 の報告でも記したが、安全は人、生活、社会にとって重要な課題であり、国として対応すべき課題であるということは中国でも十分に認識されており、北京科技大学を中核とした国家材料服役安全科学中心 (NCMS) のプロジェクト¹³⁾が進められている。NCMS の研究領域は基礎・基盤である。NCMS においても長時間クリープ試験が行われ、1 万時間以上のクリープデータが得られており、そのデータを使って金属学的な視点からの研究が行われている。小生が関わっている博士課程の学生が、研究成果をまとめて、今年 (2023 年) の 6 月に博士号を取得した。今後、さらに多くの学生がこの分野に参加し、多様な因子の影響について長時間データや知識を獲得し、構造部材の損傷評価・余寿命評価に関する研究を前進させることを願っている。

中国における材料使用安全技術分野での期待

中国における急速な成長は、USC 発電プラントばかりでない。よく知られるように、高速道路や長大橋、新幹線、高層マンションなど、あらゆる社会インフラや産業プラントが急速な勢いで建設されてきている。モノは設計図と設計許容応力を満たす材料があれば作ることができる。しかし、材料の挙動は様々な材料の要因や材料が使われる環境条件の影響を受ける。このため、モノを安全に維持管理す

るには、モノを作るときに必要な材料の知識やデータよりもはるかに多くの知識やデータが必要である。これまで、欧米や日本では成功や失敗の経験を一つ一つ積み上げながらインフラやプラントの維持管理技術を磨いてきた。しかし、急速に成長し、モノが急増する中国では、欧米やわが国での維持管理技術の開発の進め方のみでは難しいかもしれない。欧米やわが国と違った新たな手法の開発が必要であろう。しかし、この場合に、中国独自路線を歩むのではなく、国際的な協力のもとに、国際的に通用するデジュールスタンダードを目指した活動を進めてほしいと願っている。

中国では、従来、欧米やわが国で行ってきた積み上げ式の技術進歩でなく、AI などの IT 技術を積極的に取り入れた産業プラントや社会インフラの安全維持管理技術の開発を進めるべきであると小生は考えている。しかし、社会インフラや産業プラントは使用される環境条件がさまざまであり、またインフラやプラントを構成する構造材料の特性もばらつきを持っている。このことから、構造部材の破損は不確定であり、破損は確率論的である。このため、材料の選択や構造物の維持管理には、構造部材の破損確率と破損が起こった場合の被害の大きさから判断するリスクベース思考が重要であると考えている。リスクベース工学を構築するためには材料特性などの基礎データや知

識の蓄積が必要であるとともに、被害の大きさを推定するための破損事故データベースの構築や破損事故分析情報の蓄積が必要である。このことから、安全維持管理技術の開発のために AI などのような IT 技術開発とともに、基盤データや知識の蓄積、経験のデータベース化などを組み合わせた新たな技術の開発が必要となる。これらの技術開発が中国で進められることを期待したい。そして、このためには、国際的な情報交流が重要であると考えている。

研究活動を通じての中国との関わり

約 30 年前にエコマテリアルに関する研究プロジェクトがわが国で開始され、その研究を支援するためにエコマテリアル研究会が社団法人未踏科学技術協会に設立された。リーダーは山本良一元東大教授であり、小生は幹事長を務めた。この活動を海外にも広めようと計画し、中国でのエコマテリアル国際会議の開催を企画した。この準備のために 1995 年 6 月に中国（北京、蘭州）に出張したのが、小生にとって初めての中国訪問である。そして、その年の 9 月に西安でエコマテリアル国際会議を開催した。その後、エコマテリアルに関連して、1996 年 6 月に重慶、北京を訪問した。

エコマテリアルの研究活動を通じて中国の研究者と交流を持つことができたが、小生にとって中国の研究者・技術者との交流は日中高温強度シンポジウムを通じたことが大きい。日本材料学会・高温強度部門委員会は中国機械学会・高温強度部門からの提案によって、定期的に日中高温強度シンポジウムを開催することになった。中国側からの提案を受け入れたのは、中国における耐熱材料の開発研究や高温材料強度研究が進んでいると認識したためと聞いている。第 1 回は中国・洛陽で 1992 年に開催された。小生は、1994 年から 1995 年に高温強度部門委員会の委員長を務めていたことから、1995 年に長岡で開催された第 2 回シンポジウムに参加した。この時は、小生は中国側の研究者・技術者で知っている方が居らず、シ

ンポジウム開催の主催者としてだけで参加させていただいた。その後、第 3 回（1998 年、南京）、第 4 回（2001 年、つくば）、第 5 回（2004 年、西安）のシンポジウムに参加し、これらのシンポジウムで多くの中国の研究者・技術者と交流を深めた。現在、多くの中国の研究者・技術者と情報交流の機会を持たせていただいているが、日中高温強度シンポジウムで知り合ったことが非常に大きいと感じている。今年（2023 年）10 月に、第 11 回シンポジウムが成都で開催される予定である。このシンポジウムによって、日本・中国の若い研究者・技術者が情報交流を行い、互いに技術課題について理解を深める機会になることを期待している。

小生が北京科技大学・国家材料服役安全科学中心（NCMS）に関わった経緯については「日中科学技術 Vol. 163」で書かせていただいたが、2009 年に当センターの高級顧問になってから 15 年目になる。ここ 3 年半ほど、コロナのために北京に行くことはできなかったが、リモートによって修士課程の高温材料強度に関する講義をすることができた。また、小生が関わった学生が、上述のように、P92 鋼の約 1 万時間までのクリープ試験結果を使って、微細な金属組織変化とクリープ挙動を研究し、その成果を英語の論文として投稿した¹⁴⁾。そして、それらの成果も含めて研究成果をまとめ、今年の 6 月に博士号を獲得した。NCMS では、材料を安全に使うための強度評価や損傷・寿命評価の研究を金属学的な視点から進めている。非常に地味な研究であるが、材料特性評価のための研究の基盤を支える重要な研究であると考えている。今後、NCMS の研究者が世界の多くの関係者と有意義な情報交流を行い、研究活動がさらに前進することを期待している。

中国との関わり方

中国との交流で忘れられないことがある。2005 年 4 月に北京で開催された超鉄鋼シンポジウムに参加したときである。この年の 4 月初めに成都で日系スーパーに対する暴動が発生し、4 月 9 日には北京で

デモの暴徒化が起こるなど騒然とした状態であった。まさにその中でシンポジウム開催であり、外を歩くときには日本語を使わないように注意され、また北京の繁華街である王府井には出かけないようにと言われたことが忘れられない。

日中の中での政治的な対立が市民生活や経済にも影響が出るのは現在でも同じである。現在では、米中の対立が日中の関係にも大きく影響を与えている。しかし、米中の関係は政治的には対立しているが、経済的な関係、すなわち米中の貿易総額は増加し続けている。また、人材の交流も盛んで、小生が関係している研究センターでは、ある教授は米国の大学とセンターの教授を兼ねており、家族は米国で生活しており、米中を行き来している。米中間での研究者交流は濃密のよう感じられる。

学生が海外留学する際に、学生の親は中国に近い日本を留学先にしてほしいと思っているが、海外留学生を受け入れる日本のハードルは高く、また日本の大学に職を持つ中国人の教授も少ないことから、中国人研究者の広いネットワークがある米国の大学が選択されることが多いことを、中国の学生から留学相談を受けて知った。

我国はさまざまなチャンネルを持って中国と多様な交流をしていくことが重要であると思っている。寺島実郎氏は、雑誌「世界」で日本はバランス感覚に立った「自立自尊」の主体的未来構想を持ち、日米関係、日中関係を自ら持つべきと提案している¹⁵⁾。

小生は材料を安全に活用するための研究に関わってきたが、安全は国や地域を超えた人類全体の課題である。そして、材料特性は複雑であり、また材料の使われる環境もさまざまであるので、一つの国や一つの地域での経験や知識では十分とは思えない。中国の研究者は若く、また極めてアクティブである。彼らと、時には競争し、また時には協力し合って、少しでも材料使用の安全を高めるための研究が進むことにお役に立てればと願っている。

おわりに

中国での急成長に伴う技術分野の課題について、USC 発電プラントで使用される耐熱鋼の課題を通して述べた。中国には多くの課題もあるが、欧米やわが国などが積み上げてきた知識や技術とともに、AI などの IT 技術との融合を図ることによって新たな技術の開発ができれば乗り越えられるのではないかと期待している。また、プラントの安全使用技術の基盤を支える材料研究が進むことを期待している。

参考資料

- 1) Xiaomei Tan, et.al: Supercritical and ultrasupercritical coal-fired power generation, Journal of the Washington Institute of China Studies, Vol. 7, No. 1 (2012)
- 2) Source; Japan Coal Energy Center, 2013. 11. 20
- 3) Z.D. Liu: Innovation, manufacturing and engineering of 9% Cr CSEF steels in China, 1st International 9% Cr CSEF Steels Conference, October 2018, Beijing
- 4) Z.D. Liu of CISRI: 私信、2020年10月16日、2022年7月18日、2023年4月21日
- 5) J. Hald of Technical University of Denmark: 私信、2021年3月11日
- 6) K. Maile of MPA Stuttgart: 私信、2021年3月24日
- 7) R. Zhou of TPRI: 私信、2021年3月31日
- 8) 木村一弘、澤田浩太、九島秀昭: 高強度フェライト耐熱鋼のクリープ破断延性、第59期第1回高温強度部門委員会講演会資料、p. 1、2010年7月16日
- 9) 八木晃一: 安全性向上のための機械設計と材料—主として高温プラントを例として—、金属、Vol. 70(2000), No. 12, 1078-1082
- 10) 金子祥三: 日本のエネルギー政策と火力発電の将来、日本鉄鋼協会シンポジウム、2022年3月15日
- 11) Andreas Klenk of MPA Stuttgart: 私信、2023年5月30日

12) K. Yagi, O. Kanemaru, K. Kubo and C. Tanaka: Life prediction of 316 stainless steel under creep-fatigue loading, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 9(1987), No. 6, pp.395-408

13) <http://ncms.ustb.edu.cn/>

14) C. G. Shang, M. L. Wang, Z. C. Zhou, K. Yagi and Y. H. Lu: The

microstructure evolution and its effect on creep behaviors in P92 steel under different stresses, *Materials Characterization*, Vol.198 (2023), 112744

15) 寺島実郎：脳力レッスン 255、米中対立の本質と日本の針路、世界、2023年9月号、p137-p.142

2023 年度中国人留学生研究奨励賞候補者 募集

本年度は、下記の要領により2件の中国人留学生研究奨励賞の受賞候補者を募集します。

推薦された候補者の中から、選考委員会が2名の受賞者を選出し、研究奨励賞を授与します。

記

1. 候補者の資格

日本の大学・研究所等の研究機関に在籍する中国人留学生で、大学院（修士、博士）課程またはそれと同等程度ないしそれ以上のレベルの研究を行っており、日本国内または国外の学会で2回以上の口頭発表を行い、それらを1篇以上の論文として印刷公表（印刷中でもよい）している者（有給研究者は除くが、推薦受付締切り期日に博士号取得後2年以内の者はこの限りではない）。

2. 提出書類

以下の**原本1部とコピー2部**（計3部）を本会理事長宛（下記の住所）に郵送する。書類はすべて日本語で作成すること。

(1) 推薦書（推薦者は本会会員であることが必要）

推薦者の氏名、所属、連絡先住所、電話、Fax、E-mailを明記。

(2) 候補者の履歴書

氏名（漢字、フリガナ、および中国式ローマ字 pinyin で表記）、生年月日、出身地、所属機関（所在地、電話、Fax）、現住所、電話、E-mail、学歴、職歴（中国およ

び日本において職歴があれば明記）、旅券用と同じサイズの写真を貼付すること。

(3) 候補者の日本留学中の業績

- ①和文で20字以内のタイトルを付け、その内容を2000字以内に要約したもの。
- ②誌上発表論文のコピー（または別刷。印刷中ならば原稿または校正刷）、および口頭発表論文（予稿・前刷等）のコピー、それらの一覧リスト。

(4) 候補者の指導教員の氏名、職、所属（住所、電話、Fax、E-mail）

3. 推薦受付締切日：2023年10月30日
（同日の郵便消印があれば有効）

4. 奨励賞の内容：賞状および副賞10万円を、選出された各留学生に授与する。

5. 授与期日：2024年1月

上記2件の奨励賞は、会員有志からのご寄付を原資とするもので、研究分野は特定しておりません。

一般社団法人 日中科学技術交流協会
会長 山脇 道夫

〒103-0003 東京都中央区日本橋横山町3-1 横山ダイカンプラザ302号室

提出書類を上記へ郵送しましたら、下記へ郵送した旨ご連絡ください。

E-mail : nagakiya@nifty.com

第20回理事会 9月11日

・理事会議事録署名者に関して定款を総会の規定と同じく「議長及び理事会において選任された議事録署名人2名が署名又は記名押印するに変更する件は了承された。

・会員入会：韦悦周（韋悦周）教授（南華大学）からの入会申し込みがあり、協力会員として入会を認めた。

・当法人の今後の日中科学技術交流の進め方の検討がなされ有意義な議論がなされた。

会費納付の御礼

2023年度会費につきましては、2023年2月23日から8月30日時点で以下の26名の方々から40万円の納付がありました。2月23日以前の納付の方は22年度会費といたしました。厚く御礼申し上げます。

欧陽様2口、山脇様2口、山田様、福田様2口、広瀬様、山岡様、余様2口、近藤様2口、岡田様、藤田様、坂部様4口、曾我様、DaBao様、岩田様、中河様、陳迎様、石原様、數土様2口、田村様3口、永崎様2口、坂田様、依田様、有山様3口、梶谷様、八木様、任様

未納の方はご納入をお願いいたします。

正会員会費 年額1万円

振込先 日中科学技術交流協会

普通預金 みずほ銀行 横山町支店

店番040 口座番号3015881

目次

1. 北京四半世紀の思い	
協会理事 數土幸夫	1
2. 郭沫若さんと于立羣さんとの対の漢詩	
協会理事 坂田文彦	4
3. 高温材料強度研究との関わりから考える中国	
協会監事 八木晃一	8
4. 2023年度 研究奨励賞候補者募集	18
5. 第20回理事会 9月11日	19
6. 会費納付の御礼	19