

報 告

原子力機器用鉄鋼材料に関する日本・チェコ スロバキア合同シンポジウム報告

松 下 幸 雄*

Report on Japan-Czechoslovak Joint Symposium on Metallurgical Problems of Nuclear Power Equipment Production

Yukio MATSUSHITA

1. 標記日本・チェコスロバキア合同 シンポジウム開催のいきさつ

1975年5月30日より6月8日までの日程で、日本鉄鋼協会は訪チェコスロバキア鉄鋼使節団を派遣した。その構成は当時の作井誠太会長を団長とし、以下同夫人、田畑新太郎専務理事および同夫人、浅野鋼一(新日鉄)、梶山太郎(鈴鹿高専、当時大同製鋼)、松下幸雄(東京大学)の諸氏であり、その直前にモスクウで開催された第5回日ソ製鋼物理化学合同シンポジウム(本誌61(1975)15, p. 3167 参照)の好機に日程を併せたものである。その際は合同シンポジウムの形式はとらず、OstravaのNHKG (New Iron Works of Klement Gottwald) を訪問した時に、浅野、梶山および松下がそれぞれ、日本における連続鑄造法の現況、クロム軸受鋼とパーマロイのCaO-Al₂O₃系スラグによる還元精錬、スラグの有効利用と水素プラズマによる鉄-クロム合金の精錬について論文を発表し討論を行なった。

この他は、前記NHKGの他Chomutov, Jiřinecの工場見学とDobráの鉄鋼研究所訪問に当てられ、現地側はもとよりPrahaの日本大使館(本大使、古川参事官他)から心温まる厚遇を受けた。また一行は出国前、Federal Ministry of Technology and Investments 副大臣 A. Mrazek, 同省の J. Miřke 局長(使節団の実現に努力した)、Federal Ministry of Metallurgy and Heavy Engineering 関係者、鉄鋼業 Head Office 関係者と会談し、今回の行事を高く評価するとともに、今後の両国間技術協力を期待して2年後東京で合同シンポジウムを開催するよう合意した。

その後、在日チェコスロバキア大使館 V. HOTĚK 三等書記官が先方の窓口となって交渉が続けられ、1976年11月22日の日本鉄鋼協会理事会で訪日鉄鋼使節団の受入れが承認された。その実施に当つては前回のいきさつ

もあつて、松下幸雄が実行委員会委員長に指名され、田畑専務理事、荒牧透(新日鉄)、石川英次郎(大同)、小野寛(川鉄)、太田定雄(神鋼)、阪部喜代三(日鋼)、柴田雄(住金)および耳野亨(鋼管)の諸氏の協力を得て、昨年12月20日と本年2月21日の実行委員会で協議した結果、標記合同シンポジウムを3月1、2日にわたつて開催する運びとなった。その主題は標記のようになりに限定されており、先方の員数も少なく(当初5名の予定であったが、団長の R. PEŠKA 博士—General Director, Vítkovice Steelworks, Ostrava—は健康上の理由で来日せず4名となつた)提出論文も7篇であったので、その内容も考慮し日本側提出論文6篇、参加者は30名程度に限ることとした。そのプログラム、参加者および本論文は英文小冊子 Japan-Czechoslovak Joint Symposium on Metallurgical Problems of Nuclear Power Equipment Production に収録されている。(テキストは協会にて有償販賦)

2. チェコスロバキア使節団の構成と日程

前記の理由によって、Ing. Jiři Bartos (Technical Director, Poldi Steelworks, Kladno) が団長となり、以下つぎの3名である。

Doc. Dr. Ing. Jiři ELFMARK

Head of Research Group, Research Institute of Vítkovice Steelworks, Ostrava

Ing. Zdeněk MOTLOCH

Research Worker, Research Institute of Vítkovice Steelworks, Ostrava

Dr. Ing. Tasilo PRNKA

Research Manager, Iron and Steel Research Institute, Dobrá

一行は経団連会館における2日間の合同シンポジウムに出席し、3月1日夕刻は小林佐三郎会長の招待で歓迎

* 東京大学工学部教授

晩さん会を楽しんだ。この席には駐日チェコスロバキヤ代理大使他大使館関係者、日本側から作井前会長、荒木透、池島俊雄両副会長、講演者および討論参加者、実行委員が参加し有意義であった。その後は関係各社のご好意によつて、川鉄千葉製鉄所および技研、鋼管京浜製鉄所（扇島）および技研、神鋼中研、住金鋼管製造所および中研、日鋼室蘭および新日鉄基礎研などを見学し、休日は京都観光で疲れをいやした。3月12日の最終日は、V. HOTEK 三等書記官の好意でお別れの昼食会があり、日本側から作井前会長、荒木副会長、田畑専務理事、事務局佐藤公昭氏および松下幸雄が参加し、今後双方の発展を願いながら全日程を終了した。

3. シンポジウムの概要

シンポジウムの実施日程は以下のごとくで、各論文の内容および討論の状況については別項で述べる。なお、用語は英語であり、原則として発表 20 min, 討論 25 min の割当てで進行した。

3月1日(火) 午前の部

開会の辞	田畑新太郎
挨拶および使節団の紹介	松下 幸雄
使節団挨拶	T. PRNKA
論文の発表および討論	座長: T. PRNKA, 田中良平

- (1) R. PEŠKA, L. GERLE: チェコスロバキヤの鉄鋼業と原子力発電産業 (J. ELFMARK 代読)
- (2) 小野寺真作*, 阪部喜代三: わが国の発電所用材料 (*印は講演者, 以下同じ)
午後の部(I) 座長: T. PRNKA, 松下幸雄
- (3) Z. MOTLOCH: オーステナイト系ステンレス鋼の製鋼における真空処理
- (4) 片山裕之: ステンレス鋼および超合金の製造における進歩
午後の部(II) 座長: Z. MOTLOCH, 小若正倫
- (5) J. ELFMARK: オーステナイト系ステンレス鍛鋼品の性質
- (6) 島崎正英*. 鈴木公明, 大西敬三および渡辺十郎: 軽水炉压力容器用クラッド直下母材の粒界割れ
- (7) T. PRNKA: 压力容器および配管用低合金 Cr-Mo-V 鋼の強度

3月2日(水) 午前の部 座長: J. BARTOŠ, 細井祐三

- (8) J. BARTOŠ, K. PROTIVA: 軽水炉蒸気発生器用ステンレス鋼管にかかわる問題 (J. ELFMARK 代読)
- (9) 小若正倫, 富士川尚男および小林大機*: 軽水炉用ステンレン鋼管の応力腐食割れ

- (10) M. GOTTWALD, V. WALDER, and T. PRNKA*: 高速増殖炉蒸気発生器用 Cr-Mo-Ni-Nb 鋼管の開発

午後の部 座長: J. ELFMARK, 小野寺真作

- (11) 行俊照夫, 諸石大司, 川泉 勇, 吉川州彦* および志田善明: 高速増殖炉用 Cr-Mo 低合金鋼の比較
- (12) 太田定雄*, 藤原優行: 高速増殖炉蒸気発生器用 Nb 安定化 Cr-Mo 鋼の性質
- (13) J. DOLÉNEK, T. PRNKA*, P. MORCINEK, and J. SOBOTKA: 17 Cr-12 Ni-2Mo 薄肉鋼管溶接継手のクリープ強度

閉会の辞	田畑新太郎
使節団挨拶	J. ELFMARK
挨拶	松下 幸雄

4. 論文および討論の内容

以下前記の論文整理番号に沿つて内容を簡略に紹介し、主要なコメントや質疑討論を記載する。参加者氏名は原則として省略しているが明記したものもある。

論文(1)は J. ELFMARK によつて代読されたものであり、十分な討論はできなかつた嫌いがある。内容はチェコスロバキヤの鉄鋼業発展の経緯を述べ(1975年時点で約 14×10^6 t), とくに鋼管は人口1人当たり約 90 kg (1974年)で世界一であること、将来の鉄鋼業、重工業は大形の精密プラントをつくる指向であることなどを強調している。電力産業については、現在の発電量は 12.5 GW で人口1人当たり約 0.83kW であるが、2000年時点で 55~60GW に拡大することになっており、ウラン資源保有国であるので原子力発電を強化すると述べている。これに対し、軽水炉の安全性評価、またその 7000 h/y という運転時間は供用期間中検査を考えると長すぎないか、日本では 800~1600MW タービン発電機を製作できるなど話題があり、荒木透は金材研における原子炉材料研究の現況、松下幸雄は通産省工技院の原子力製鉄開発研究の進展についてコメントを行なつた。

論文(2)はわが国の水力、火力および原子力発電計画に沿い、大形鍛鋼品および鋳鋼品、厚鋼板に重点をおいて技術進歩と将来の動向を総説したものである。ことに、ローター材(タービン発電機)用の 400~500 t 鋼塊についての技術、PWR および BWR 蒸気発生器の压力容器用材料、LWR 炉心支持用の 50 t ステンレス鍛鋼品などが述べられ、プラントの大形化に伴う新しい設計に沿う材料開発が必要であることを強調している。チェコ側から前記ステンレス鍛鋼品の製造法、ローター材における VCD (Vacuum Carbon Deoxidation) について質問があり、また原子炉材料開発面での日本における進歩、基礎研究などに関する私見を質した。

論文(3)は低りんオーステナイト系ステンレス鋼溶製

のために Vitkovice Steelworks で開発した平炉 (50 t) ~DH (真空吸上げ) 真空処理~アーク炉~DH 真空処理による 2 重溶解法, 40 t 規模の VOD (Vacuum Oxygen Decarburization) 法によるステンレス鋼製造を述べたものである。これに対し, フェロクロムと溶製鋼のりん含有量 (それぞれ 0.025~0.030%, 0.012~0.015%), クロム歩留, 生産性, TiN による清浄度低下などが質問され, また中西恭二は VOD 法における TiN クラスタ防止に関するコメントを述べた。

論文(4)はステンレス鋼溶製技術の進歩を総括したもので, ことに VOD 法の改善により (C+N) 含有量を低下させた超フェライト系ステンレス鋼, AOD (Argon Oxygen Decarburization) 法による低いおう (< 0.002%) オーステナイト系ステンレス鋼, 連続製造スラブおよびブルーム製造における電磁攪拌, Ca を含むフラックスによる高クロム鋼の脱りん, 脱窒素, 脱硫などを述べている。チェコ側からは, Ca を含むフラックスによる精錬の要領, VOD 法と AOD 法の比較について質疑があった。

論文(5)は 5~30 t ステンレス鍛鋼品の製造に関するものであり, 前記論文(2)の 1 部として触れられている。超音波探傷に対する健全性, 疲れ強さと粒界腐食抵抗を保証するにはプロセス全般にわたる細心の注意が必要であり, オーステナイト結晶粒度を ASTM 4~6 の細粒にすること 700~900°C の低温度で十分鍛造して後工程の Ti 炭窒化物による析出硬化を助長することなどを述べ, これにより 300~350°C の耐力が 177~250 N mm⁻² になるといっている。これに対し細粒化の方法, 粒界腐食抵抗の測定法など質疑があり, 工藤浩一は厚さ 508 mm (51 t) ディスクの製造経験, 市之瀬弘之は変形抵抗を歪速度, 温度, 合金組成の関数として示すコメントを行なった。

論文(6)はオーステナイト系ステンレス鋼クラッド直下の低合金鋼母材に発生する溶接後歪取り焼なましに伴う微細割れ (Reheat cracking) を総説したもので, 1960 年代初頭以降の内外における研究成果を述べている。わが国では, とくに熱影響部の挙動に研究が集中した経緯が説明され, 308 クラッド直下の粗粒部 (母材 SA 508 Class 2) に熱処理前のオーステナイト結晶粒界に沿って割れが発生することを示している。その機構として, 粒度, 炭化物析出, 母材組成, 残留応力, 高温における伸びなどを主要因と考え, 割れ防止対策は Mn-Mo-Ni 系のように感受性の低い母材を使用すること, 表面脱炭層を有効に利用すること, 低熱入力クラッド法を使用しで焼ならしを行なうことであるとしている。

論文(7)は Cr-Mo-V 鋼の強化機構を述べたもので, 理論考察では常温の降伏点を示す理論式として, パイエルス-ナバロウ応力を 40MPa に取り転位密度, 整合または非整合析出粒子, 置換形および侵入形溶質原子の寄

与を組み入れている。実験の部では 27 個の試料を用いており, 転位密度を高めることが強化に有効であると述べている。これに対し, 高温では前記理論式が成立しないこと, 炭窒化物析出の前段階, 溶接の難易などについて討論があつた。

論文(8)は J. ELFMARK によつて代読されたものであり, 1 号炉の炭酸ガス冷却型 150MWe に続く 440MW 軽水炉 (前記論文(1)に述べられている) の蒸気発生器用ステンレス鋼管として 08 Cr 17 Ni 12 Mo 2 (AISI 316 H 相当) を採用するにいたつた経緯を述べており, 日本側から材料選択の基本姿勢, 応力腐食割れに対する感受性, その測定法など質疑があつたが十分意をつくすことができなかつた。

論文(9)は応力腐食割れ抵抗の大きいオーステナイト系ステンレス鋼 SCR-3 を開発した経緯を述べており, MgCl₂ を含む沸騰水では Ni, Si, C は応力腐食割れ (SCC) を抑制するが P と Mo が有害であること, Cl⁻ を少量含む高温高圧水では C が有害で Cu, Mo, Cr が SCC を抑制することを確かめている。これに基づき, 種々の環境下で SCR-3 が比較材 AISI 304, Inconel 600, Incoloy 800 より勝れており, 粒界腐食にも強いと述べている。チェコ側から SCR-3 に対する Ti の効果が質問されたが, これのみが SCC に有効であるわけではないとのことであつた。

論文(10)はチェコスロバキヤにおいて 1990 年代に予想される Na 冷却高速増殖炉 (以下の論文とも関連があるので LMFBR と略記する) の蒸気発生器用低合金鋼管に関するもので, 15313NiNb (2 1/4Cr-1Mo-0.6Ni-1Nb) を推奨するまでの研究成果をまとめている。析出相の主なものは NbC_xN_y であることからオーステナイト化温度は 1000~1050°C (空冷), 焼もどし温度は 580~620°C など熱処理管理の重要性を述べている。これに対し, 応力腐食割れと Ni の関係, 設計指針に当たつての 0.2% 耐力とクリープ破断強度の考え方, 溶接割れ感受性などについて討論された。

論文(11)は前論文と指向は同一であり, LMFBR 用に 2 1/4 Cr-1Mo (焼なまし), 2 1/4 Cr-1Mo (焼ならしおよび焼もどし), 低炭素 2 1/4 Cr-1Mo, 2 1/4 Cr-1Mo-Nb, 2 1/4 Cr-1Mo-Nb-Ti, 2 1/4 Cr-1Mo-Nb-Ni の各種につき機械的性質, 高温強度, Na 中における脱炭 (これは主としてクロム炭化物の分解と変態であるとしている), 溶接性などを調べた結果, 2 1/4 Cr-1Mo (焼ならしおよび焼もどし) を推奨し, 脱炭が許されなければ 2 1/4 Cr-1Mo-Nb-Ni を推すというのが結論である。チェコ側からの質問に対しては, 将来 510~590°C の高温が要求されれば 9 Cr-2 Mo のような材料が期待できるとの答えがあつた。

論文(12)も前論文と目的は同一であり, Nb 安定化 2 1/4 Cr-1Mo 鋼の Na 中における脱炭 (ステンレス鋼

との拡散対および Na ループによって調べている) に対する抵抗, クリープ破断強度, 機械的性質, 溶接性などを系統的に研究した結果, Cr と Nb の主要な役割が確かめられ 0.04C-2.25Cr-0.5Nb-0.5Ni が望ましい組成であるとしている. チェコ側からは, この材料の熱間加工性, 遊離 Nb 量 ($\sim 0.1\%$), クリープ伸び (1000h で 20~30%), 析出相の形態 (NbC または Fe_2Nb の分散粒子), 液体 Na 中におけるクリープ試験などに関する質問があつた.

論文 (13) は水蒸気過熱器用鋼管としての非安定化オーステナイト系ステンレス鋼 17Cr-12Ni-2Mo の溶接継手強度を述べたもので, 溶着金属は 16Cr-8Ni-2Mo であり溶接後 1050°C の溶体化処理を施したものと溶接のままとの 5 つの組み合わせについて, 引張試験, 曲げ試験, 硬さ分布測定, クリープ破断試験を行ない, 溶接後焼なましを施さなくともクリープ強度は十分であつて延性も適切であると述べている. これに対し, 焼なましを施さない場合の少量の δ -フェライトが高温クリープ中に σ 相に変化することの影響, 延性の評価に絞りを採用する理由, 強度および延性への微量不純物の影響などが討議され, ASME コードの下限を上回る強度を目標に研究中であることが付言された. なお, T. PRNKA は論文 (7) の補遺としてバナジウム炭化物の析出, 転位の相互作用に関するコメントを行なった.

5. ま と め

筆者が体験した 2 国間合同討議には, 日本鉄鋼協会関係ではたとえば日独セミナーとか日ソ製鋼物理化学合同シンポジウムなどがあるが, 今回は参加者規模もそれらの

1/3以下で大変こじんまりした, 半面親しみやすい会議ではなかったかと思っている. 前記 2 例についてもいえるが, 英語を話す国民でないもの同士が互いに努力して共通語で討論したわけであるが, この度は日本側を実質討論参加者に限つたこともあつて, 比較的少壮気鋭の諸兄がよく発言して国際会議なれした一面をのぞかせ, この意味でも有効な企画であつたと考えている. ただすでに述べた理由で筆者が実行に当つたので, その内容が専攻領域をはなれた主題であつたこともあつて, この記録に不十分な点の多いことは申訳ないと思う.

会議の最後に行なわれた代表団の挨拶, 日本鉄鋼協会側の閉会の辞にも触れられたように, お互いに顔を合わせて直接話し合える機会は極めて貴重であり, 今回限りでなく継続できれば大変幸せである. ただあまり形式にとられる必要はなく, 主題も今回の類いに拘束されることはないのではないかと思う.

これもすでに述べたが, 代表団は会議終了後各社のご好意で研究所, 工場の見学を行なつており, 実行委員および会議参加者の方々には大変なご協力を頂いたが, 代表団としても目のあたり日本鉄鋼業の一面をのぞき見, またさらに対話を深め十分な認識を持ちかえつたことであろう. 関係各位にこの稿をかりて厚く感謝する.

シンポジウムの運営に当つては, 日本鉄鋼協会の佐藤公昭氏, 成木朝雄氏 (技術部員) および国際課諸嬢が大変努力されたし, 討論のまとめその他雑事には有田 稔, 小倉康継両氏 (東京工業大学) を煩わせた. 併せて深謝する次第である. なお, 代表団はかなりの数の論文別刷類を置いているが, これらは日本鉄鋼協会に保管されていることを付記する.