

特集 天野清生誕 100 周年記念

論文

天野の温度計測研究*

小川 実吉**

K. Amano's studies on thermometry

Miyoshi OGAWA

Abstract

This year marks the one hundredth anniversary of K. Amano's birth. On this occasion, by consulting a large number of documents he left behind, his achievements in thermometric research(1935～1944), mainly the establishment of thermometry standard and its application to iron and steel industries are summarized in this paper.

Keywords: Kiyoshi Amano, thermometry standard, thermometry application

1 はじめに

温度計の歴史を遡るとガラス温度計の 1768 年に平賀源内が数本のタルトメートル(寒暖計)を作り知人知己に配ったのが最初の国産品といわれているが、残念なことに一本も残っていないそうである。2003 年 11 月に江戸開府 400 年、東京都記念事業の一環として、江戸東京博物館で、「計量いま・むかし展」が開催された。そこには、平賀源内の文献(寒熱昇降記)でしか辿れなかった寒暖計が、東日本計量器工業協同組合及び関係者の熱意と努力で作られ出されたタルトメートル参考製作品(現実にはないものなので、レプリカとか復元品とかいう文言は避けられた)の形で展示された。

一方、計量法制化の面では、1885(明治 18)年フランス政府の勧めによりメートル条約に加盟し、1891 年にメートル法と尺貫法の併用で度量衡法が制定された。

ガラス製温度計は、温度の法定基準器(現行法でも)として 1921(大正 10)年に法律(度量

衡法)に基づき当時の農務省中央度量衡検定所(現産業技術総合研究所 計量標準総合センター)で常温付近の目盛検査(校正)の対象とされた¹⁾。これが公的機関による温度標準供給のはじまりでありトレーサビリティ制度の創設ともいえる。

ガラス温度計は、寒暖計として気象観測に体温計として医療用などの社会生活に用いられ、産業用としては養蚕に重宝された。やがて、日露戦争(1894～95)前後に軍需部門を中心に重工業が発達すると、要求される温度測定範囲が 1000℃を超える高温度域まで拡大された。それに応えて、海外では既に工業用温度計として普及していた熱電温度計が、1919 年に国産化された。

当初の国産温度計は、国際標準が未確定の時代なのでメーカー標準で作られていたが、海外技術を導入していたので海外品と遜色ない性能、精度を有していた。1927 年にメートル条約に基づく 1927 年国際温度目盛(ITS-27)が創設され

* 受付 2007 年 5 月 10 日 ** 会員 〒226-0027 神奈川県横浜市緑区長津田 2-34-6-17
E-mail: m-ogawa@eo2.itscom.net

て、実用国際基準として確立された。天野清の温度計との関りは、ITS-27 の翻訳論文の発表を大きな節目としており、ここから多数の研究報告が発表されて飛躍を見せたようである。

本報告は、主に日本学術振興会製鋼第 19 委員会及び日本学術振興会第 17 特別委員会の研究活動から天野の業績を述べる。

2 国際温度目盛の創設²⁾に関する研究

国際的な温度標準の取決めである「国際温度目盛」は、1927 年国際温度目盛 (ITS-27) を出発点として温度標準のトレーサビリティ体系整備に寄与してきた。その内容は、「国際温度目盛ニ就テ」昭和 11 年 11 月 5 日、天野清著で邦訳文として公表された。この論文の冒頭の一部を紹介する。

人も知るように、温度の目盛として理論的に最も明確なのは熱力学に基づく絶対温度目盛 (Lord Kelvin、William Thomsom の考案) であって、之は気体温度計に依って近似的に実現することが出来、国際的にも基本的温度目盛として承認されている。併し気体温度計は実用上では不便なものであるから、精密測定に適した然も実用的な目盛の方式を定めて、平常の研究証明に標準として使用する必要が生じた。1911 年以来、英 (NPL)、米、(NBS) 独 (PTB) の 3 国立研究所がこの目的のために協力して研究論議を重ねた結果、1927 年 10 月 4 日第 7 回国際度量衡総会の決議により ITS-27 は採択されたものが、以下にその内容を訳出した国際温度目盛である。決議の正文は第 8 回総会 (1933 年) で曖昧な点や誤植が訂正されて今日に至り、その間この国際温度目盛は急速に世界各国に普及しつつある。唯これは実用を主眼としたものであるから、決して熱力学的 (絶対温度) 目盛りに代わろうとするものでない点に注意しなければならない。

ITS-27 は「融解しつつある氷の温度及び水蒸

気の凝縮温度の何れも標準気圧の下における温度を、それぞれ 0℃及び 100℃と定める熱力学的百分目盛を基本目盛とする。」との原則で定義された。

表 1 国際温度目盛の基本定点

定 点	ITS-27/℃	ITS-90/℃
酸素の沸騰点	-182.97	-182.954
水の三重点	—	0.01
氷の融解点	0	0
水の沸騰点	100	99.974
亜鉛の凝固点	—	419.505
硫黄の沸騰点	444.60	削除
銀の凝固点	960.5	961.78
金の凝固点	1063.0	1064.18

ITS-27 の、表 1 の基本定点の間を目盛る補間用標準温度計は、-190℃から 630℃までは白金抵抗温度計、630℃から金の凝固点までは白金／白金ロジウム熱電対 (現行 S 熱電対相当) 及び金点以上は放射温度計と規定され、温度定点には 2 次定点も採用された。国際温度目盛は、制定後現在に至る 77 年間 (表 1) に、1948 年、1968 年、1990 年と 3 回の改訂を経て現行の 1990 年国際温度目盛 (ITS-90) まで、ほぼ 20 年毎に変更されてきた。表 1 の酸素の沸点、氷の融解点、及び水の沸騰点は今や定義定点から削除されているが実用温度計の校正には利用されているので、ITS-90 の温度値を参考に記載した。かつて、定義定点に採用されていた硫黄の沸騰点や二次定点として規定されたナフタリンの沸騰点 (217.96℃)、ベンゾフェノンの沸騰点 (305.9℃)、カドミウムの凝固点 (320.9℃) などは環境への問題や取扱いが面倒なので、校正装置としても使用されなくなった。

3 日本学術振興会における温度計測研究²⁾

日本で温度計測の組織的な研究活動は、昭和 11 年 (1936 年) 3 月に発足した、日本学術振興

会製鋼第 19 委員会第 2 分科会(学振 19 委 2 分科会)が始まりである。

この委員会の主目的は、製鋼に関する研究で、温度計測は製鋼プロセスには重要な技術課題であるとの合意により、第 2 分科会を設置して組織的に温度計測の研究が開始された。当時の研究状況及び成果は、昭和 15 年(1940 年)3 月に日本学術振興会から刊行、昭和 52 年(1977 年)3 月復刻された「第 19 小委員会報告Ⅳ、高温計ニ関スル研究(1)」に見ることができる。実質最初の研究会と見られる第 2 回会議(昭和 11 年 9 月 7 日)に ITS-27 の資料を天野が提出し発表して国際温度目盛の啓蒙を図った。

この文献には、第 6 回会議(昭和 14 年 6 月 26 日)までの提出資料(論文等)が収録されており、天野の論文は 5 件ある。

その中では、光高温計の標準的計測法の研究が中心に行われているが、熱電対に関する研究は、モリブデン／タングステン熱電対と鉄／タングステン熱電対による溶鋼温度の測定結果が報告されており、測定値は光高温計と比較して同程度の値が得られたが、溶鋼に浸漬して測定するには、耐熱、耐食性を確保する保護管が得られないこと、熱電対を固定する取付方法が難しく測定中は人手によって保持しなければならないことなど、測定条件の維持に難点が多くて、実用には至らなかった。したがって、当時は光高温計の利用に努力が傾注された。

注目すべきは、当分科会の第 1 回会議で実地製鋼工場に於ける研究会の開催が決議されたことである。それは、各所において使用されている光高温計は、輻射能採用値(放射率)、測定の位置や方法が不統一で、各工場の測定値に差異がある不合理の状況が発見された結果、測器及び個人誤差より生ずる誤りを探求する必要が痛感され、総合研究に参加している官庁の研究所、工場の研究所及び工場現場に於いて現に日々測熱に従事している技術者を一ヶ所に会合して、同一状況で溶鋼その他の温度を同時に測定して、真正妥当な補正值を発見しさらに高温

計及び測定方法の改善等に資することが決議されたのである。海軍省にその旨を申請の結果、直に許可の指令が下り、昭和 11 年 6 月に 2 日間、呉海軍工廠製鋼部に於いて出席者 44 名で共同実験、講演会が開催された。天野は、実測に参加したほか、光高温計の比較検査について講演した。

学振 19 委 2 分科会における天野の活動は、昭和 19 年 8 月の会議までに 13 件の資料に記録されている。その研究報告は、温度標準、光高温計、熱電対など広範囲の分野にわたり、温度計測標準の研究に加えて現場計測まで及んでいる。なかでも、注目すべき点は、昭和 12 年 5 月発表の「キュポラ湯出時に於ける熔鋼流の温度分布の研究」は、熔鋼流を写真撮影して温度分布を観測するという後年のパターン計測の一手法をいち早く試行したものであり、真に敬服に値する。他、熔鋼現場に於ける温度の測定(昭和 13 年 9 月)にも見られるように標準確立の研究のみならず現場測定の信頼性評価にも力が注がれている。

学振 19 委 2 分科会は、その後も継続されたが、1994 年 2 月を以って日本学術振興会産業計測第 36 委員会温度計測分科会に引継がれて、伝統を踏襲して現在も活動は続けられている。

4 戦時下における熱電温度計の研究³⁾

熱電対の素材(Pt、Rh、ニッケル(Ni)など)を輸入に依存しているわが国では、戦争が始まると資源が不足した。資源節約の国家プロジェクトが発足する中で、熱電対もその対象になり昭和 16(1941)年に日本学術振興会第 17 特別委員会「不足資源問題速決特別委員会」第 2 分科会「不足資源節約を目的とする熱電式高温計の研究」(以下学振 17 委 2 分科会という)が設置され、以降延べ 40 回の研究会議を開催し、昭和 20 年 1 月 17 日最終会議を行い研究会は終息した。

委員会は、委員長大山松次郎(東京大学)、幹事岡田喜義(逓信省電気試験所)、委員が 12 名

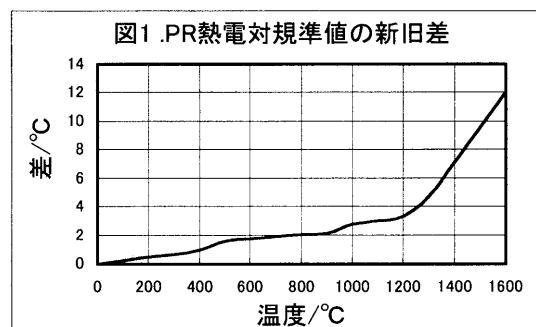
(商工省中央度量衡検定所天野清、国立研究所 2 名、大学 4 名、官庁 2 名、企業 3 名) の総勢 15 名で構成された。

学振 17 委 2 分科会は、熱電対用 Pt 及び Rh の使用削減を目的とする研究組織で、使用削減を実現するには熱電対の本質に関わる特性などを明らかにすることが重要であることに注目して広範囲に精力的な調査研究を行った。その研究成果は、Pt・Rh 熱電対の高温領域における諸特性の調査研究に基づき適切な使用法が規定されたことをはじめ、Pt・Rh 熱電対国産化の研究開発、校正をはじめとする性能評価の試験法の研究、さらに Pt・Rh 熱電対の代用熱電対の研究や工業用温度計測には欠かせない保護管の研究など広範囲にわたる。研究の主旨である節約については、1000℃以下では Pt・Rh 熱電対を使用しないこと、線径は通常 $\phi 0.5$ mm であるが $\phi 0.4$ mm にする、さらに影響がなければ $\phi 0.35$ mm まで細くして、できるだけ細くすることが規定された。校正をはじめとする性能評価の試験法の研究では、基本となる規準熱起電力値は海外の規格を参考にしながら規定されている。熱電対の校正に関する研究、技術基準の制定に天野が重要な役割を果たした代表的な項目を以下に紹介する。

4.1 規準熱起電力の制定と定点校正

当時の規準熱起電力値と現行 JIS (JIS C1602:1995) の R 熱電対の規準熱起電力との差を作図すると図 1 の通り、1100℃で+3℃、1500℃が+10℃程度である。60 数年を経て国際温度目盛の改訂は 3 回行われ白金線の品位も向上するなど熱起電力特性に影響を及ぼす幾つもの要因を考慮すれば、新旧差は技術の進展の証といえよう。

校正の研究では、金属の凝固点を用いた PR 熱電対の校正が精力的に行われている。定点金属としては、国産品 4 社、NBS 標準物質 3 種、ドイツ製品 1 社の錫 (231.85℃)、鉛 (327.3℃)、亜鉛 (419.5℃)、アンチモン (630.5℃)、銀



(960.5℃)、金 (1063℃)、銅 (1084℃) が採用されている。ここに記した温度値は当時の値である。各社の金属による熱起電力の差は、 $1\mu\text{V}$ から $3\mu\text{V}$ 程度である。

これらの研究成果は、わが国における熱電対に関する初めての組織的な研究であり、現在の定点校正技術基準に引継がれている。

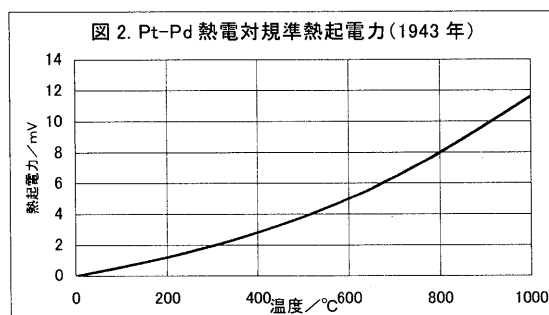
4.2 新しい標準熱電対の研究

(白金 - パラジウム(Pt-Pd)熱電対)

純金属線同士を組合せたこの熱電対は安定性に優れており標準用の熱電対に有用であるとして研究されてきた。国内では 1998 年頃から Pt-Pd 熱電対を標準熱電対に採用すべく日本学術振興会産業計測第 36 委員会温度計測分科会を中心に共同研究を行い、産総研の研究成果に基づき 2002 年に標準熱電対 (JCSS 特定二次標準器) として採用された。Pt-Pd 熱電対が 60 年も前に天野によって研究されていたことは驚嘆に値する。

当時の研究は、素線の品位の評価から始められている。パラジウムの抵抗比 R_{100}/R_0 と熱起電力 (1943 年 5 月、天野清) では、日本鉱業(株)製の Pd 線 (線径 0.5 mm、長さ 1m) についての試験結果が報告されている。さらに遡って、1929 年に NPL (英国立物理研究所) の校正を受けて、Pd 線が用いられていた。添付された校正証明書の写真には、抵抗比 $(R_{100}/R_0) = 1.3775$ が記載されている。

Pt-Pd 熱電対の当時の熱起電力特性の報告値は、図 2 の通りである。

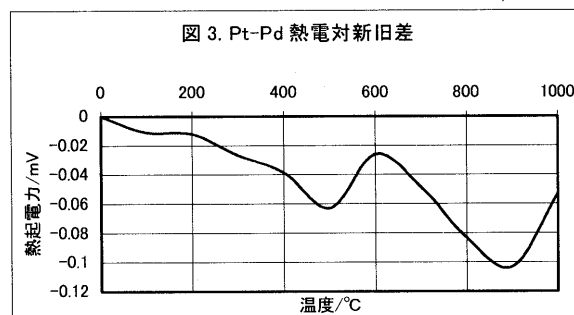


現行規格は、唯一アメリカの ASTM 規格 E1751 に規定されている。その規準熱起電力値と比較すると図 3 の通り最大で 10°C 程度の差異がある。現在、IEC 62460 として原案が公表されているので、近く、Pt-Pd 熱電対として制定されるはずである。

4.3 Pt-Rh 代用熱電対の研究

白金の節約のための方策として、白金・ロジウム熱電対と同等もしくはそれに近い金属があれば代用できるので、大幅な達成が期待できる。そこに着眼されたと思われる論文が学術振興会の二つの研究会に提出された。この論文は、1930 年代に主にアメリカ、イギリスで発表された論文を体系的に構成して翻訳されたもので熱電対の原理から使用上の事項、校正に至るまで広範囲にわたり、熱電対の研究には貴重な論文であると共に、学振 17 委 2 分科会の研究に貢献したはずである。当時は海外からの技術情報が少ない時期であったと推測されるので大きな役割を果たしたものと考えられる。

天野らがまとめた資料(熱電対用金属材料)^{5), 6)}では、A 総論が熱電的法則、熱電対、副接点(基準接点)の温度、寄生熱起電力、熱電対用材料の選択、熱電力と温度の関係、単結晶の熱電的性質、融解点及び金属変態の際の熱電的性質、合金の熱電的性質、熱電力と歪、熱電的電位列、熱電力測定法(偏読法、補償法)、熱電対の検定、の基本的事項について解説されている。ここで、熱起電力測定法の偏読法とは可動コイル型計器、補償法は電位差計を用いる方法である。熱



電対の検定は、表 1 の温度定点である沸騰点、凝固点による較正方法が解説され、金属点については凝固点(ルツボ法)に加えて溶融点(針金法)も紹介されている。

B 各論では、実用化された熱電対について次のように解説されている。

- 1) 貴金属熱電対の金属材料、白金 - 白金ロジウム熱電対、ロジウム - 白金ロジウム熱電対、パラプラット熱電対、レニウム熱電対、イリジウム熱電対。
- 2) 卑金属熱電対の金属材料、0~600°C の温度測定用熱電対、高温用熱電対、低温用熱電対。
- 3) 熱電対材料の熱電特性、特殊用途を持つ熱電対、熱電対用保護管。

項目 1) のうち白金 - 白金ロジウム熱電対は現在の R、S 熱電対だが、他に、高温用として、ロジウム、レニウム、イリジウムなどによる熱電対も着目された。なお、馴染みがないパラプラット熱電対は金、パラジウムを主とする合金と白金、ロジウム、イリジウム、パラジウムを主とする合金の組合せである。卑金属熱電対としては、現在も使われる K、E、J、T に相当する熱電対が紹介されている。特別高温用熱電対についてはタングステンも言及されており、この時期には現在実用化されている熱電対の基礎研究が進んでいた。近年、温度計、中でも熱電対のルーツを辿る論文集として文献⁸⁾が重宝されているが、この書籍の発行以前に熱電対に関する海外論文が天野により収集され綿密に翻訳され解説されたこと、その技術が現在実用化さ

れている温度計測の基礎となっていることに、改めて敬服させられた。

5. 使用実績の調査

高温計の使用実績については、1944 年 4 月、5 月に工場の現地調査の結果が報告されている。内容は、硝子製造所における Pt 熱電対の使用の現状と節約方策を扱っている。

- (1)目的 L&N 社から購入した Pt 熱電対に比して国産品の寿命が短いので Pt 線の改良が要請された。当研究会の調査では国産品は外国品に遜色ないと判断した。現地調査で Pt 線節約に寄与する方策を探った。
- (2)問題点 Pt 熱電対は硝子溶融中の温度測定及びシャモット管の焼成に使用している。溶融硝子の温度は 1450℃、シャモット焼成温度は 1,500℃である。いずれも保護管が劣化して外気が進入し Pt 線が変色している。保護管の改良が必要である。
- (3)対策 保護管の入手が困難である。輻射温度計の利用を勧めた。取りあえず、輻射温度計（シーメンス製アルドメータ）を貸与して試験して良好の結果を得た。

6. おわりに

筆者は、天野清が遺した学振 17 委 2 分科会の資料に基づき、戦時下日本の熱電温度計測の調査研究を行う機会を得たのが縁で、この講演会に出講することとなった。温度計測の業務に携わって 50 年を過ぎてしまったが、その間馴染んだ技術情報は、先駆者の天野によってもたらされていたことを再認識して感無量であった。このたび調査した範囲は、前述の学振 17 委 2 分科会に加えて学振 19 委 2 分科会の戦中活動までであるが、筆者も、後者の戦後活動から学振 36 委へと 30 年以上も委員として在籍しているので、古くからの資料を現代の眼で調べることができた。さらに、高田誠二先生から関係資料を提供していただき本稿を纏めることができた。

従来は、天野は温度計測技術の先駆者と言う

伝説しか知り得なかったが、今回の調査で、温度標準の研究という国立標準研究所の本来の役割はもとより実用温度計測、加えて測定現場の鉄鋼、硝子関係工場まで出かけて調査し指導まで実践されていたこと、とりわけ、溶鋼の流れを写真撮影して面の温度計測、すなわち温度分布の観測の革新的な手法まで考案されていたことなどをも知って、敬服というほかに言葉がない。

参考文献

- 1) 菅野、日本における温度計測の歩み、計測と制御、Vol.9、No.7、(1970 年 7 月)、計測自動制御学会
- 2) 天野、国際温度目盛ニ就テ、高温計に関する研究、日本学術振興会、昭和 15 年 3 月
- 3) 第 19 小委員会報告 IX 高温計に関する研究(1) 日本学術振興会、昭和 15 年 3 月 31 日 (昭和 52 年 3 月復刻)
- 4) 日本学術振興会、第 17 特別委員会第 2 分科会提出資料一式、昭和 16 年 5 月から昭和 19 年 10 月。
- 5) 天野清・酒井五郎 熱電対用金属材料(I) 鉄と鋼 第 28 年 第 8 号 74/84 日本鉄鋼協会 昭和 17 年 8 月 25 日
- 6) 天野清・酒井五郎 熱電対用金属材料(II) 鉄と鋼 第 28 年 第 9 号 108/122 日本鉄鋼協会 昭和 17 年 9 月
- 7) 小川、高田、戦時下日本の熱電温度計測、計量史研究、Vol. No.1 (2007 年 1 月) 日本計量史学会
- 8) AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, TEMPERATURE Its Measurement and Control In Science and Industry (Papers presented at a Symposium held in New York City, November, 1939) 初版 1941 年、3 版 1952 年

表 2. 天野の日本学術振興会製鋼第 19 委員会第 2 分科会提出資料

番 号	表 題	提出日	共 著
67	国際温度目盛について	昭和 11 年 12 月	酒井五郎
98	キューポラ湯出時に於ける熔鋼流の温度分布	昭和 12 年 5 月	
175	光高温計の目盛検査と検査用標準電球の使用法	昭和 13 年 9 月	
183	光高温計に依る熔鋼温度測定上の注意事項	昭和 13 年 9 月	
184	交流電源の調査	昭和 13 年 9 月	
185	熔鋼現場に於ける温度の測定	昭和 13 年 9 月	
505	製鋼用高温計の考察	昭和 15 年 3 月	
508	附図 I・II 観測表の頻度表	昭和 15 年 4 月	
518	光高温計の精度に関する材料	昭和 15 年 5 月	
661	光高温計に依る熔鋼温度の測定精度	昭和 16 年 1 月	
719	光高温計に依る鋼の鋳込み温度測定の精度	昭和 16 年 6 月	
815	W-Mo 呉式熱電対試験成績	昭和 16 年 9 月	
1093	熱電対用金属材料 (I)	昭和 18 年 1 月	
1094	熱電対用金属材料 (II)	昭和 18 年 1 月	
1242	真温度及び輝度温度の記号	昭和 18 年 11 月	
1432	小形標準電球を使用する光高温計検査装置の精度	昭和 19 年 8 月	
1638	熱電温度計故障統計調査	昭和 21 年 3 月	

表 3. 日本学術振興会 第 17 特別委員会「不足資源問題速決特別委員会」

第 2 分科会「不足資源節約を目的とする熱電式高温計の研究」

番 号	題 名	提出日付
資-3	熱電対一覧表	昭和 16 年 5 月 28 日
資-6	複合熱電対の理論の拡張とその白金代用熱電対への応用	昭和 16 年 6 月 26 日
資-16	W-Mo 呉式熱電対の試験成績	昭和 16 年 8 月 18 日
資-37	無ニッケル熱電対の熱起電力	昭和 17 年 3 月 17 日
資-49	金属材料研究所より提出せる白金熱電対の試験成績	昭和 17 年 6 月 17 日
資-57	標準熱電対の較正試験法参考資料 (1)	昭和 17 年 7 月 17 日
資-64	熱電対用金属材料 I (鉄と鋼 第 28 年第 8 号)	昭和 17 年 9 月 17 日
資-72	熱電対用金属材料 II (鉄と鋼 第 28 年第 9 号)	昭和 18 年 1 月 18 日
資-74	金属製保護管 (性能一覧表)	昭和 18 年 1 月 18 日
資-75	陶器製保護管 (性能一覧表)	昭和 18 年 1 月 18 日
資-87	パラジウムの抵抗比 R100/R0 と熱起電力	昭和 18 年 5 月 17 日
資-114	NPL の白金線の抵抗比試験成績書写本	昭和 18 年 12 月 18 日
資-122	日本鉱業製白金線の試験成績書	昭和 19 年 1 月 17 日
資-126	白金線相互の熱起電力の比較	昭和 19 年 2 月 17 日
資-136	白金熱電対使用の現状と節約	昭和 19 年 5 月 17 日