

JAERI - M
85-007

JT-60 第1 壁材の輻射率の測定
(Inconel 625, Mo, TiC被覆Mo)
(臨界プラズマ試験装置設計報告・150)

1985年2月

中村 博雄・清水 正亜・牧野 俊郎*
国友 孟*

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 原子力資料サービス

JT-60 第1壁材の輻射率の測定
(Inconel 625, Mo, TiC被覆Mo)
(臨界プラズマ試験装置設計報告・150)

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部
中村 博雄・清水 正亜・牧野 俊郎*・国友 孟*

(1985年1月11日受理)

JT-60第1壁の除熱特性の詳細評価のために、第1壁材であるInconel 625, Mo, TiC被覆Moの光学鏡面および実機模擬表面に対する輻射率および反射率等の熱輻射性質を測定した。実機表面は、酸洗い面(Inconel 625)、電解研磨面(Mo)および被覆面(TiC被覆Mo)である。測定は、室温から最大1300°Kの範囲で、可視域から赤外域(0.34~20 μ m)について行った。また、Inconel 625およびMoの光学鏡面の測定結果について、金属電子論に基づき解析を行い波長・温度依存の輻射率の一般式を求めた。光学鏡面の輻射率スペクトルから求めた全輻射率によれば、Inconel 625の場合、温度依存性は小さく、0.13(常温)~0.21(1300°K)であり、Moの場合、温度依存性は大きく、0.035(常温)~0.18(1300°K)である。また、TiC被覆Moの場合、0.053(常温)である。一方、実機表面の常温における全輻射率は、0.35(Inconel 625)、0.124(Mo)、および0.073(TiC被覆Mo)であり、光学鏡面の値に比較して1.4~3.5倍大きい。

輻射率の波長・温度依存性が大きいことから、輻射伝熱量の精度良い評価のためには、これらの依存性を考慮したモデルが必要である。

* 京都大学 工学部

Measurements of emissivities on JT-60
first wall materials
(Inconel 625, Mo, TiC-coated Mo)

Hiroo NAKAMURA, Masatsugu SHIMIZU,
Toshiro MAKINO* and Takeshi KUNITOMO*

Department of Large Tokamak Development,
Tokai Research Establishment, JAERI
(Received January 11, 1985)

To evaluate heat removal performance of JT-60 first wall, emissivities and reflectivities on Inconel 625, Mo, TiC coated Mo with optically smooth surface and actual surface are measured at temperature from a room temperature to 1300 K. Spectra are measured in the range of wave lengths from 0.34 μm to 20 μm . Actual surfaces are machined/pickled surfaces for Inconel 625, electro-polished surfaces for molybdenum, and as-coated surfaces for TiC-coated molybdenum. Results of Inconel 625 and molybdenum with optically smooth surfaces are examined by a two-electrons-type dispersion model of optical constants. Electronic constants of the equation are given and formulated in order to correlates the macroscopic properties of the radiative heat transfer.

Total emissivities, obtained from the spectral emissivities of optically smooth surface, are 0.13(RT) ~ 0.21(1300 K) for Inconel 625, 0.035(RT) ~ 0.18(1300 K) for Mo, and 0.053(RT) for TiC-coated Mo. Moreover, total emissivities of the actual surface at a room temperature are 0.35(Inconel 625), 0.124(Mo), and 0.073(TiC-coated Mo).

Large dependence of the emissivities on temperature and wave length shows that the model including these dependences is necessary for an accurate evaluation of the radiative heat transfer.

Keywords: JT-60, First Wall Materials, Heat Removal Performance, Mo, Inconel 625, TiC Coated Molybdenum, Optically Smooth Surfaces, Emissivity, Reflectivity, 0.34-20 μm , Wave Length 1300 °K

* Department of Engineering Science, Kyoto University, Kyoto, Japan

目 次

| | |
|---------------------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 実験装置および実験方法 | 1 |
| 3. 実験結果および考察 | 8 |
| 4. 解析 | 16 |
| 4.1 理論 | 16 |
| 4.2 スペクトルの解析 | 18 |
| 4.3 全輻射率と輻射伝熱量の計算 | 19 |
| 5. おわりに | 27 |
| 謝 辞 | 27 |
| 参考文献 | 28 |
| 付 録 | 29 |
| 'Ni, Co, Cr, Mo, Ta, W, TiC, TiNの輻射率' | 29 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Experimental device and procedures | 1 |
| 3. Results and discussions | 8 |
| 4. Analysis | 16 |
| 4.1 Theory | 16 |
| 4.2 Spectrum analysis | 18 |
| 4.3 Total emissivities and radiative heat transfer | 19 |
| 5. Conclusion | 27 |
| Acknowledgements | 27 |
| References | 28 |
| Appendix | 29 |
| 'Emissivities of Ni, Co, Cr, Mo, Ta, W, TiC, TiN' | 29 |

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置 JT-60 は、トカマク型核融合装置の科学的実証のための臨界プラズマ条件の実現および核融合炉心プラズマの開発研究を主要な目的としており、1985年3月の実験開始を目指して、現在調整試験が進められている。JT-60では、臨界プラズマ条件の達成のため、第2段加熱パワーは30 MW、また、放電時間は5~10秒である⁽¹⁾。この様に、1放電あたりの熱エネルギーは、加熱パワーが数 MW、放電時間が約1秒程度の現在の中型装置に比較して、桁違いに大きい、そのため、真空容器内面に取付けられる第1壁への熱負荷が厳しく、高熱負荷に耐える第1壁設計は重要な課題の1つである⁽²⁾。第1壁の熱設計において重要な物性値のひとつに輻射率がある。

一方、エネルギー機器の高温化に伴ない、種々の材料の輻射率の測定が行われている^{(3)~(5)}。しかしながら、JT-60の第1壁材料である Inconel 625, M_0 , および TiC 被覆 M_0 に関する輻射率の研究は、少ない。また、輻射率は材料の表面状態に大きく左右されるため、同じ材料であっても、表面状態が異なれば、輻射率は違った値を示す。

以上の理由から、Inconel 625, M_0 , および TiC 被覆 M_0 について、最少の輻射伝熱量を示す光学鏡面および実機模擬表面の反射スペクトルおよび輻射スペクトルを測定した。また、光学鏡面のスペクトルに対して金属電子論に基づく解析を行ない、光学定数の波長・温度依存性を表す一般式を求めた。

2章では、実験装置および実験方法について述べた。3章では、実験結果を示した考察を述べた。4章では、解析の基礎となる理論、スペクトルの解析および輻射率の波長・温度依存性と輻射伝熱量の関係について述べた。5章では、まとめについて述べた。また、付録には、参考データとして、第1壁に使用される可能性のある材料の輻射率を示した^{(6), (7)}

2. 実験装置および実験方法

実験には、表2-1に示す M_0 , Inconel 625 および TiC 被覆 M_0 を用いた。3種の材料の光学鏡面試料は、物質に固有の光学的性質を調べるために用いる。その表面は最大あらかさが300 nm以下になるようにバフ研磨してある。また、JT-60第1壁の実機表面の輻射データを測定するために、 M_0 は電解研磨試料、Inconel 625 は酸洗い試料、 TiC 被覆 M_0 は被覆面試料を用いた。3種の材料の組成を、表2-2に示す。また、図2-1に M_0 および Inconel 625 の実機表面の形状を示す。 M_0 の電解研磨面の最大あらかさは、0.3 μm 程度で、Inconel 625 の酸洗い面の最大あらかさは、1 μm 程度である。Inconel 625 は、機械加工面のため、面粗さは方向により異なる。 TiC 被覆 M_0 試料の TiC 被覆厚さは、20 μm である。光学鏡面試料は、被覆層の性質を調べるために、5, 10, および15 μm の試料を作成後、それらを光学鏡面に研磨し

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置 JT-60 は、トカマク型核融合装置の科学的実証のための臨界プラズマ条件の実現および核融合炉心プラズマの開発研究を主要な目的としており、1985年3月の実験開始を目指して、現在調整試験が進められている。JT-60では、臨界プラズマ条件の達成のため、第2段加熱パワーは30MW、また、放電時間は5~10秒である⁽¹⁾。この様に、1放電あたりの熱エネルギーは、加熱パワーが数MW、放電時間が約1秒程度の現在の中型装置に比較して、桁違いに大きい、そのため、真空容器内面に取付けられる第1壁への熱負荷が厳しく、高熱負荷に耐える第1壁設計は重要な課題の1つである⁽²⁾。第1壁の熱設計において重要な物性値のひとつに輻射率がある。

一方、エネルギー機器の高温化に伴ない、種々の材料の輻射率の測定が行われている^{(3)~(5)}。しかしながら、JT-60の第1壁材料である Inconel 625, M_0 , および T_iC 被覆 M_0 に関する輻射率の研究は、少ない。また、輻射率は材料の表面状態に大きく左右されるため、同じ材料であっても、表面状態が異なれば、輻射率は違った値を示す。

以上の理由から、Inconel 625, M_0 , および T_iC 被覆 M_0 について、最少の輻射伝熱量を示す光学鏡面および実機模擬表面の反射スペクトルおよび輻射スペクトルを測定した。また、光学鏡面のスペクトルに対して金属電子論に基づく解析を行ない、光学定数の波長・温度依存性を表す一般式を求めた。

2章では、実験装置および実験方法について述べた。3章では、実験結果を示した考察を述べた。4章では、解析の基礎となる理論、スペクトルの解析および輻射率の波長・温度依存性と輻射伝熱量の関係について述べた。5章では、まとめについて述べた。また、付録には、参考データとして、第1壁に使用される可能性のある材料の輻射率を示した^{(6), (7)}

2. 実験装置および実験方法

実験には、表2-1に示す M_0 , Inconel 625 および T_iC 被覆 M_0 を用いた。3種の材料の光学鏡面試料は、物質に固有の光学的性質を調べるために用いる。その表面は最大あらかさが300nm以下になるようにバフ研磨してある。また、JT-60第1壁の実機表面の輻射データを測定するために、 M_0 は電解研磨試料、Inconel 625 は酸洗い試料、 T_iC 被覆 M_0 は被覆面試料を用いた。3種の材料の組成を、表2-2に示す。また、図2-1に M_0 および Inconel 625 の実機表面の形状を示す。 M_0 の電解研磨面の最大あらかさは、0.3 μm 程度で、Inconel 625 の酸洗い面の最大あらかさは、1 μm 程度である。Inconel 625 は、機械加工面のため、面粗さは方向により異なる。 T_iC 被覆 M_0 試料の T_iC 被覆厚さは、20 μm である。光学鏡面試料は、被覆層の性質を調べるために、5, 10, および15 μm の試料を作成後、それらを光学鏡面に研磨し

た。研磨後の膜厚は、それぞれ $2.6 \mu\text{m}$ 、 $4.9 \mu\text{m}$ 、および $5.2 \mu\text{m}$ であった。図 2-2 に、断面の写真を示す。

輻射データの測定は、室温の反射率 (R) 測定および高温の輻射率 (ϵ) 測定に大別される。反射率測定は、更に光学鏡面についての垂直反射率 R_N の測定および実用表面についての垂直入射半球反射率 R_H の鏡面反射成分 R_S と拡散反射成分 R_D の測定に分けられる。図 2-3 に、鏡面反射測定装置の概要を示す。光学鏡面の垂直反射率 R_N は、通常の分光光度計の光路に、鏡面反射測定装置をそう入して測定を行なう。鏡面の垂直輻射率 ϵ_N は、 $1 - R_N$ で得られる。次に、実用表面の反射率測定は、これらの粗面では反射は散乱反射的に起こるので、前述の鏡面反射測定装置と、拡散反射測定装置を併用して、垂直入射半球反射率 R_H の鏡面反射成分 R_D を測定することにより行なう。 R_H は、 $R_S + R_D$ であり、 ϵ_N は $1 - R_H$ から求まる。図 2-4 に、拡散反射測定装置の概要を示す。その実験方法の詳細は、文献〔8〕に示されている。光源 S_1 (可視・近赤外用) または S_2 (赤外用) からの光は、チョップ C および分光器を経て試料または標準試料に垂直に入射する。試料からの、拡散反射光は、放物面鏡 M_p および球面鏡 M_{s1} により反射され、検出器 D に達する。反射率は、標準試料の値を基準として算出した。

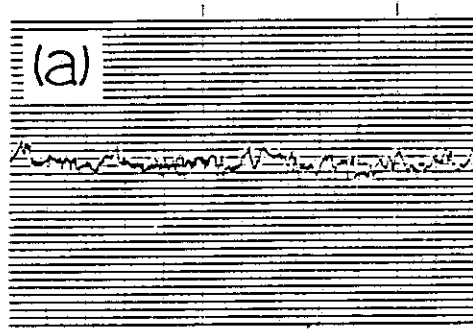
高温では、図 2-5 に示す実験装置を用いて垂直輻射率 ϵ_N を測定する。その実験方法の詳細は、文献〔4〕に示されている。 ϵ_N は、黒体からの放射強度と試料からの放射強度を比較することにより算出する。測定温度範囲は、 $900 \sim 1300^\circ\text{K}$ であり、測定波長範囲は、 $0.34 \sim 20 \mu\text{m}$ である。測定中の真空度は、 10^3 Pa 程度である。

Table 2-1 General condition of specimens.

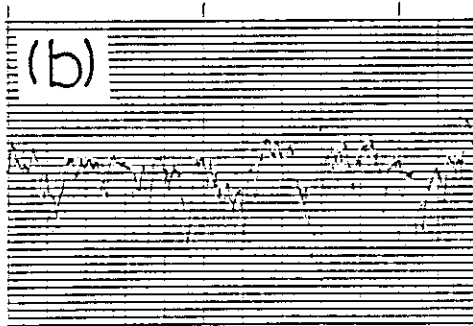
| Material | Surface | Roughness |
|------------------------------------|--------------------|----------------|
| Molybdenum | Optically smooth | |
| | Electropolished | Fig. 2-1(a) |
| Inconel 625 | Optically smooth | |
| | Machined & pickled | Fig.2-1(b),(c) |
| Titanium Carbide coated Molybdenum | Optically smooth | |
| | As coated | |

Table 2-2 Chemical composite of specimens.

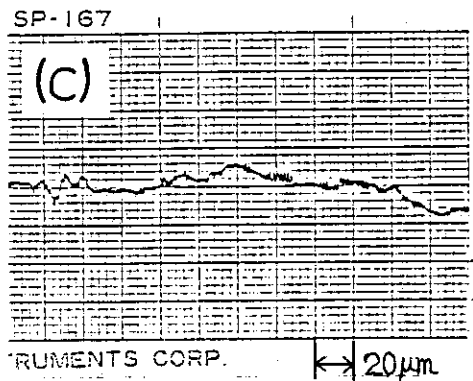
| | M ₀ | Inconel 625 | TiC coated M ₀ |
|---------------------------|--|---|--------------------------------|
| Chemical composite wt (%) | M ₀ > 99.9 O ₂ 20 ppm C 15~20 ppm H ₂ 15~20 ppm N ₂ 15~20 ppm B 25 ppm Fe < 100 ppm Mn, Ni < 50 ppm Cr < 40 ppm Al, Si, Ca < 15 ppm Sn | Ni 60.72 Cr 22.30 Fe 3.90 Mo 8.70 Nb + Ta 3.58 Si 0.34 Ti 0.19 Mn, Al, C, S < 0.08 | C / Ti 0.998 (atomic ratio) |
| Fabrication Method | Powder Metallurgy | | Plasma C.V.D coating |



Electropolished
surface of Mo



Machined & pickled
surface of Inconel 625
(Perpendicular to
groove direction)



Machined & pickled
surface of Inconel 625
(Parallel to
groove direction)

Fig. 2-1 Surface profiles of Mo, Inconel 625.

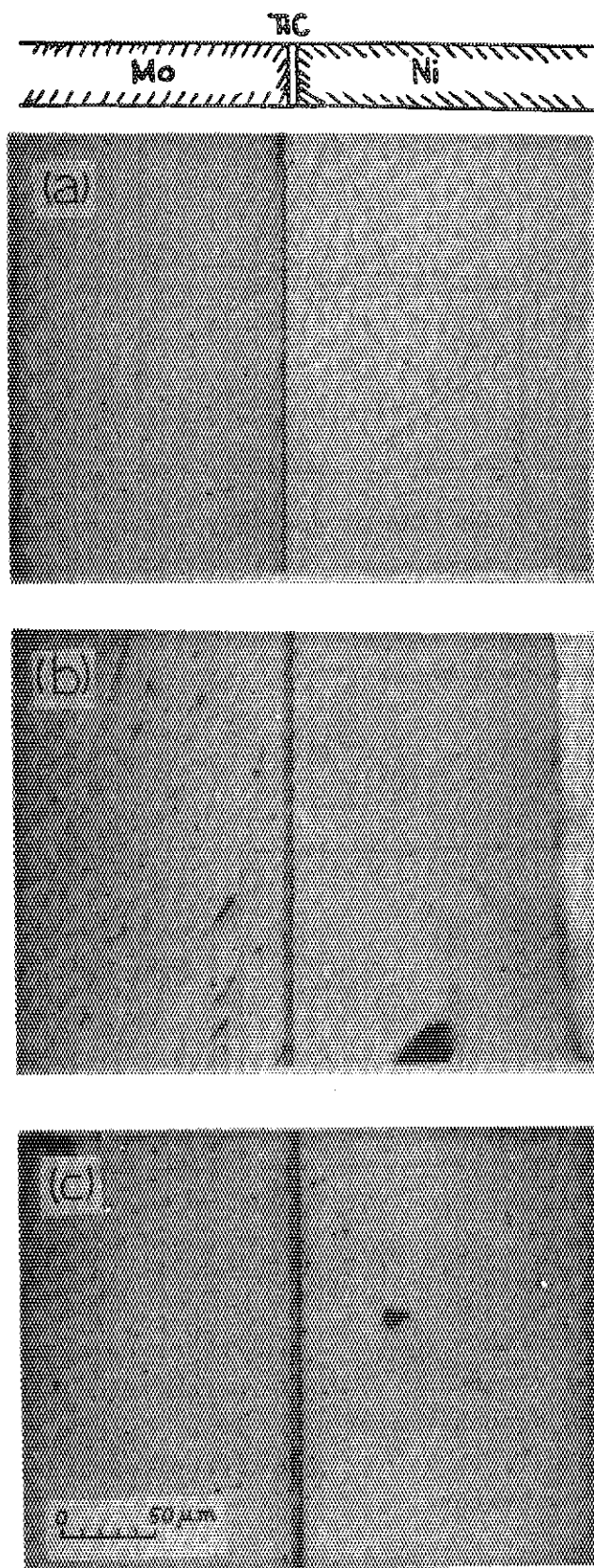


Fig. 2-2 Cross section of TiC-coated Mo specimens.
TiC thickness. (a) 2.6 μm (b) 4.9 μm (c) 5.2 μm

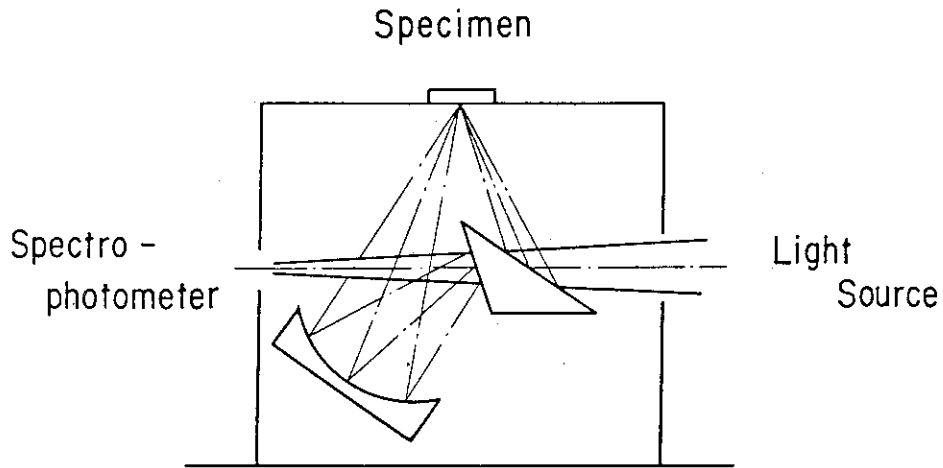
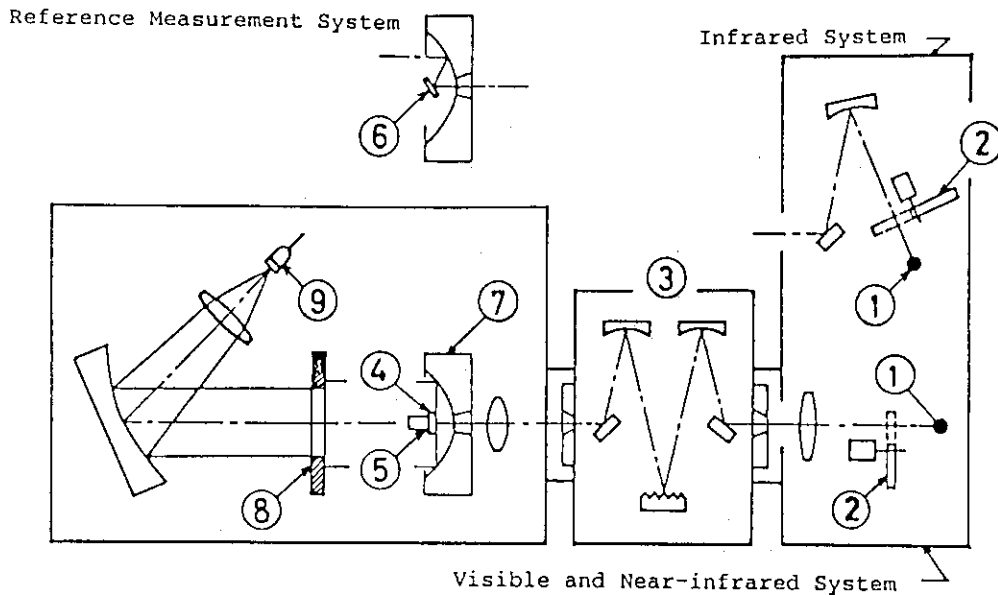


Fig. 2-3 Outline of specular reflectivity measurement device.



- | | |
|-------------------------|------------------------------|
| 1 light source | 6 reference specular surface |
| 2 optical chopper | 7 paraboroidal mirror |
| 3 grating monochromator | 8 iris |
| 4 specimen | 9 pyroelectric detector |
| 5 nichrome heater | |

Fig. 2-4 Outline of diffuse reflectivity measurement device.

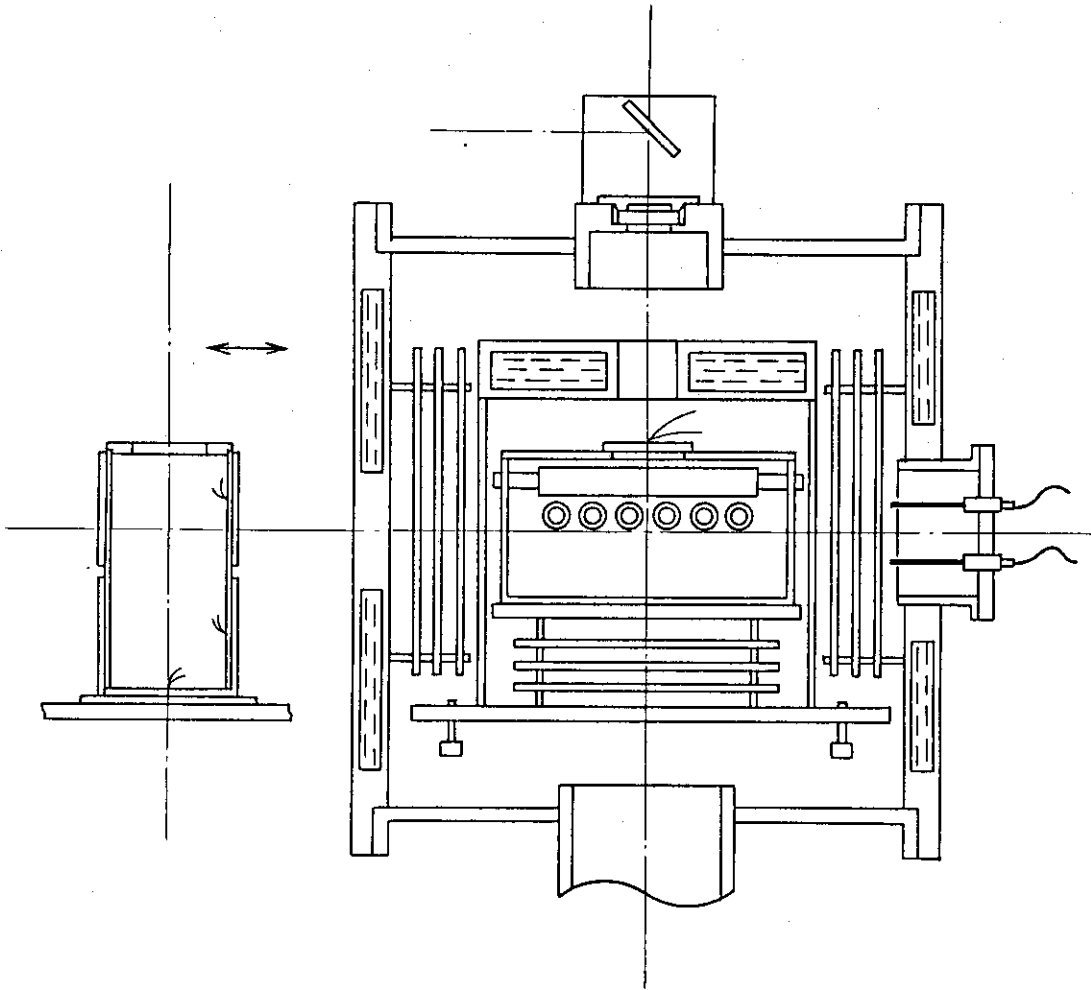


Fig. 2-5 Outline of normal emissivity measurement device.

3. 実験結果および考察

実験結果を、図3-1~図3-10に示す。図3-1に、M₀光学鏡面の室温における垂直反射率 R_N を示す。また、図3-2は、室温、900°K、1100°Kおよび1300°Kにおける垂直輻射率 ϵ_N である。 ϵ_N のスペクトルには、赤外域の短波長側では、帯間遷移吸収が見られ、帯間遷移の長波長側では伝導電子吸収が見られる。図3-3に、M₀電解研磨面の室温における垂直入射半球反射率 R_H 、鏡面反射成分 R_S 、拡散反射成分 R_D を示す。そのスペクトルは、粗い金属表面に特有の変化を示している。 R_S は、波長の増加とともに増加し、遠赤外域では鏡面の値に漸近する。 R_D は、基本的にこの逆のふるまいをする。ただし、2 μ m以下での吸収はM₀に固有の帯間遷移に起因する。 R_H は、鏡面の値(図3-1の R_N)に比べてとくに短波長側で小さい。図3-4に、M₀電解研磨面の室温、900°K、および1100°Kにおける垂直輻射率 ϵ_N を示す。900°Kおよび1100°Kのスペクトルは、鏡面のスペクトルに比べてわずかに高い程度である。また、 ϵ_N (900°K)と ϵ_N (1100°K)の関係は、鏡面の場合と同程度である。室温の ϵ_N のスペクトルだけが異質なものに見えるが、これは実験装置系の差違に起因する。室温の反射装置は、試料への入射光束を絞って ϕ 0.5 mmの程度の局所的な性質に注目するためである。伝熱計算では、安全側として輻射率は小さめに評価すべきであるので、この場合M₀の電解研磨面の ϵ_N としては高温の値を用いるのがよいと考えられる。図3-5に、Inconel 625の光学鏡面の室温における、垂直反射率 R_N を示す。また、図3-6に、900°Kおよび1200°Kにおける垂直輻射率 ϵ_N を示す。比較的なだらかな傾きのこれらのスペクトルは、ステンレス鋼・超合金などの耐熱合金に特有のものである⁽³⁾。その光吸収は、伝導電子のメカニズムによる。高温の値は、著しく高いがその原因は特定できない。しかし、耐熱合金の場合、初期酸化が起こりやすいので 10^{-3} Paの真空中の酸化が考えられる。また、Ni基合金のいくつかを示す結晶配列の規則性の熱履歴現象が関係していることも考えられる。図3-7に、Inconel 625の酸洗面の室温における垂直入射半球反射率 R_H 、鏡面反射成分 R_S 、拡散反射成分 R_D を示す。この試料は、機械加工の切削きずがあり、その反射率は試料の設置方向に依存する。そのため、図には、たがいに直角な方向について測定した値の平均値を示している。表面形状が反射性質に及ぼす効果の様式は、基本的にM₀の場合と同様であるか、この表面では短波長域でも R_S 成分が高い。図3-8に、Inconel 625の酸洗面の室温における垂直輻射率 ϵ_N を示す。光学鏡面のものに比べて、その値はかなり大きい。高温での値は未知であるが、M₀におけると同様に、より小さな ϵ_N が測定される可能性がある。図3-9に、TiC被覆M₀光学鏡面の垂直入射半球反射率 R_H の鏡面反射成分 R_S を示す。拡散反射成分 R_D は殆ど無いため、 R_S は R_H に等しいとみなせる。TiC被覆M₀の反射率は高く、その大きさは金属や合金の反射率のオーダーにある。スペクトルは、金属のものと傾向が似ており、金属に近い性質を有していると考えられる。図には、膜厚が2.6 μ m、4.9 μ mおよび5.2 μ mのデータを示した。また、参考のためにM₀の光学鏡面の反射率(図3-1)を示した。膜厚が2.6~5.2 μ mの範囲では、反射率の差は少ない。このことから、膜厚がこの程度以上あるTiC被覆面では母材のM₀の影響はまったく現われないと考えられる。図3-10に、

T₁C被覆M₀の実機模擬表面の室温における反射率を示す。全体の傾向は、M₀の実機模擬表面の反射率のスペクトルと似ている。R_sは、波長の増加とともに増加し、遠赤外域では光学鏡面の値に漸近している。R_Dは、逆の傾向を示している。2 μm以下の波長では、被覆面の反射率は、光学鏡面の反射率に比べて小さく、約半分である。図3-11に、反射率のスペクトルから算出した、光学鏡面および被覆面の垂直輻射率ε_Nを示す。

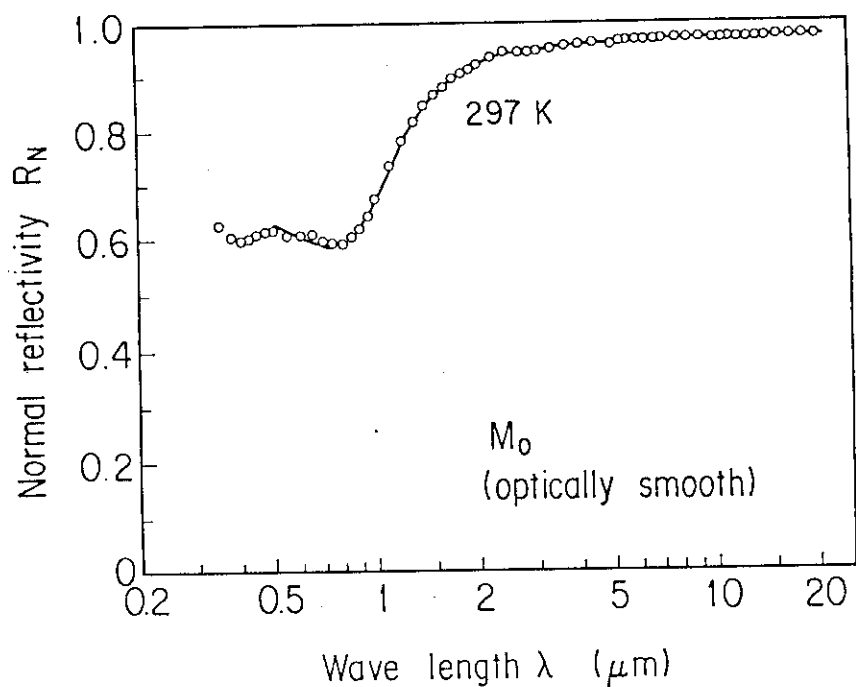


Fig. 3-1 Wavelength dependence of normal reflectivity for optically smooth Mo.

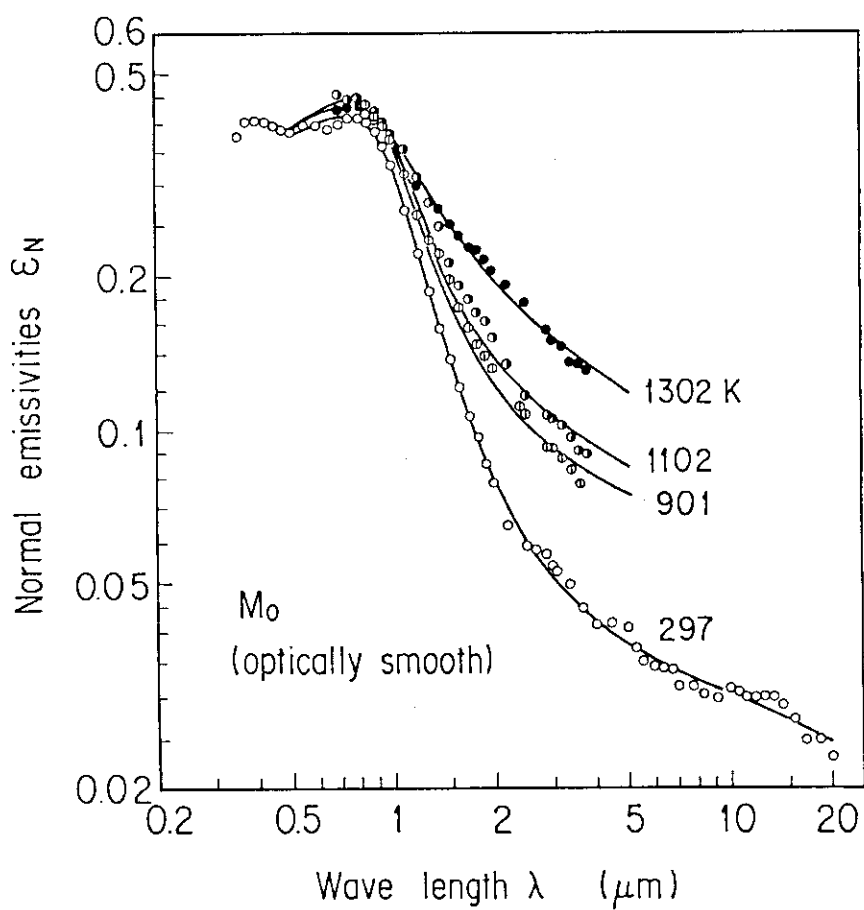


Fig. 3-2 Wavelength dependence of normal emissivities for optically smooth Mo.

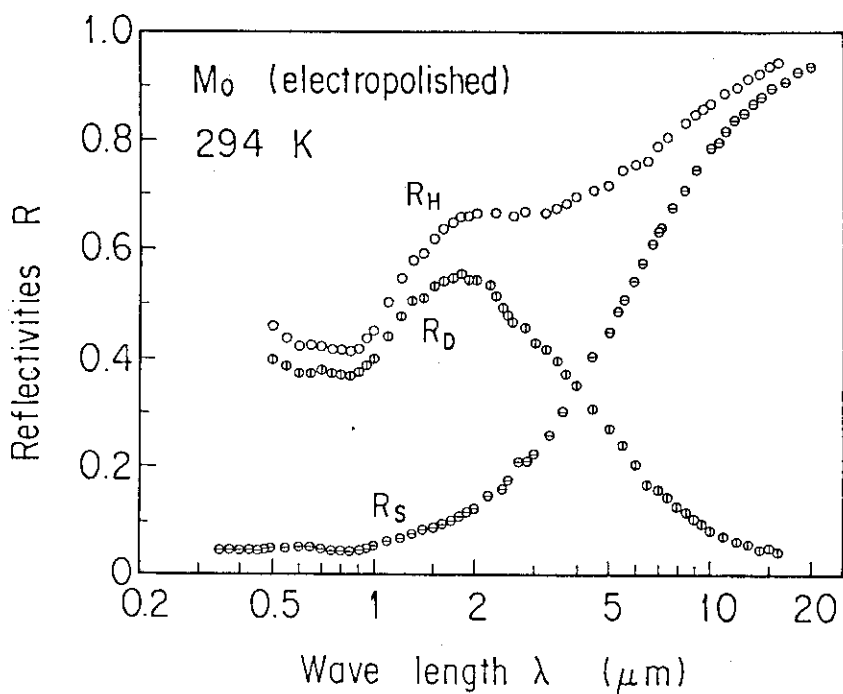


Fig. 3-3 Wavelength dependence of reflectivities for electropolished Mo.

(R_S : Specular reflectivity, R_D : diffuse reflectivity)
(R_H : Hemispherical reflectivity)

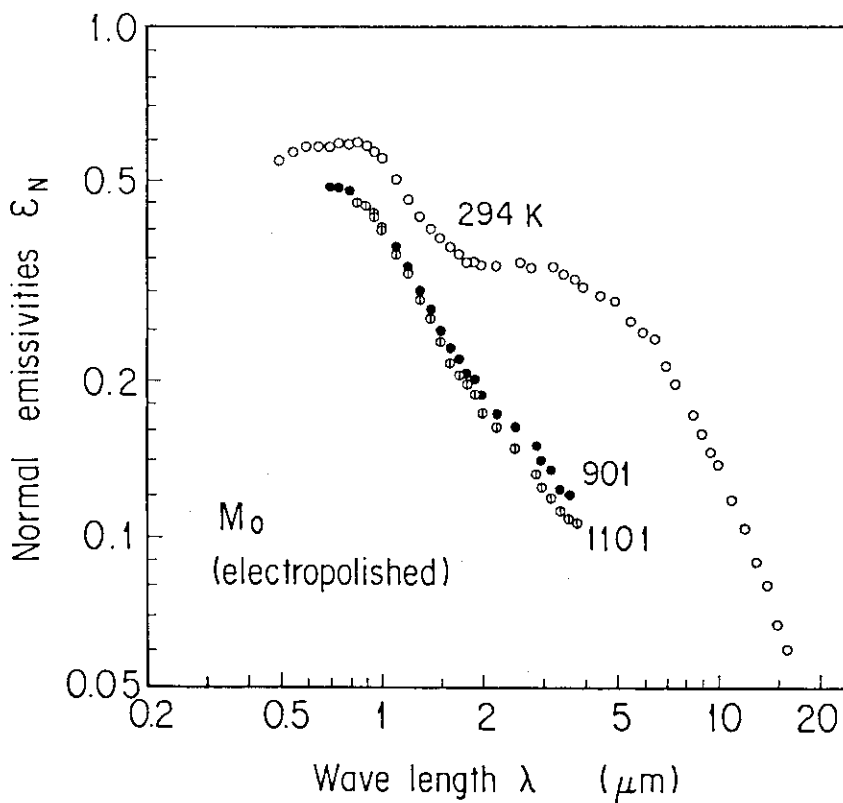


Fig. 3-4 Wavelength dependence of normal emissivity for electropolished Mo.

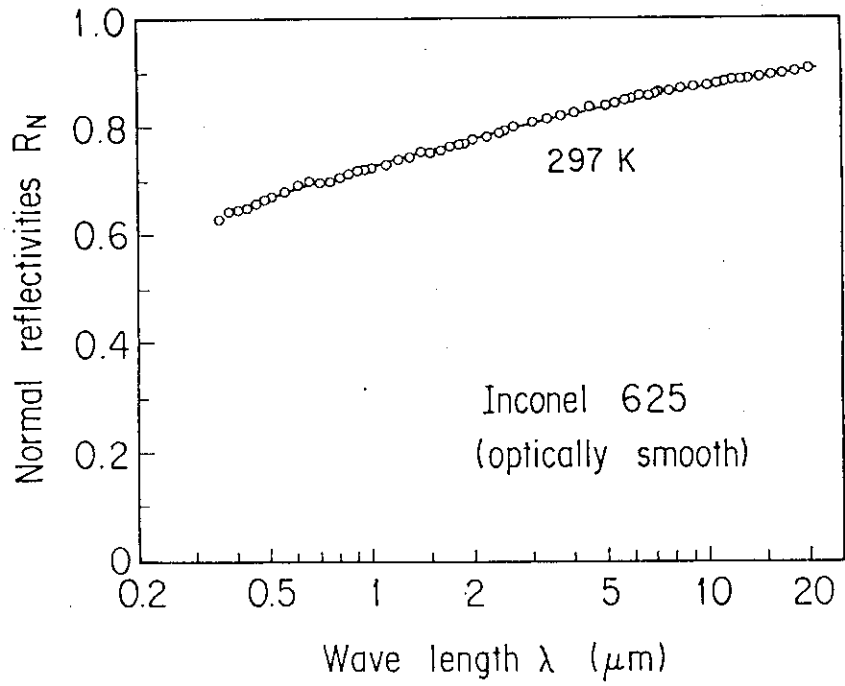


Fig. 3-5 Wavelength dependence of normal reflectivity for optically smooth Inconel 625.

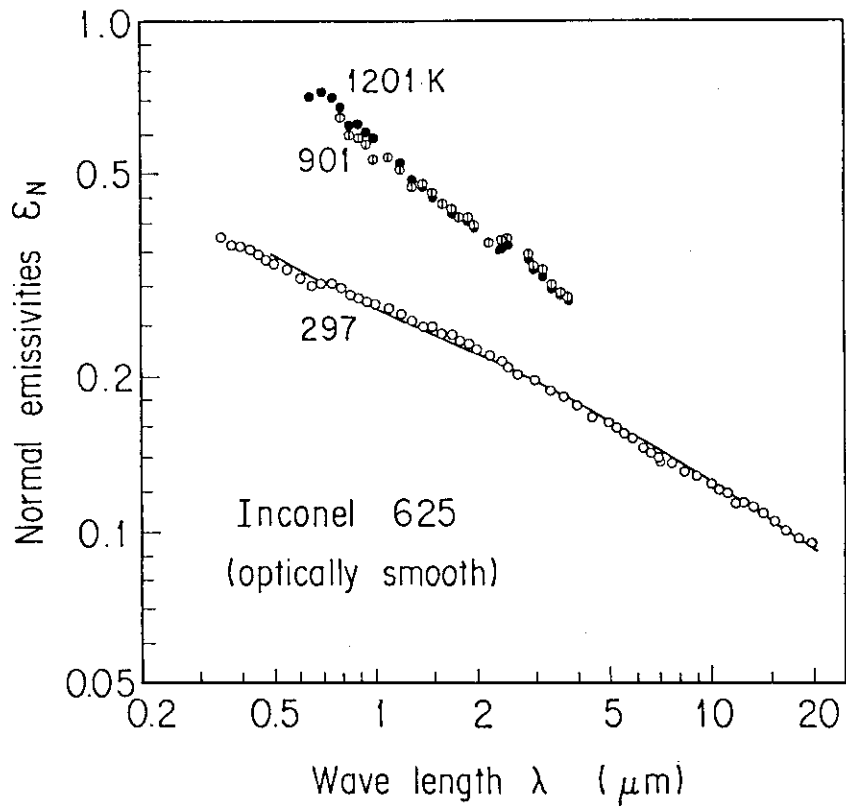


Fig. 3-6 Wavelength dependence of normal emissivities for optically smooth Inconel 625.

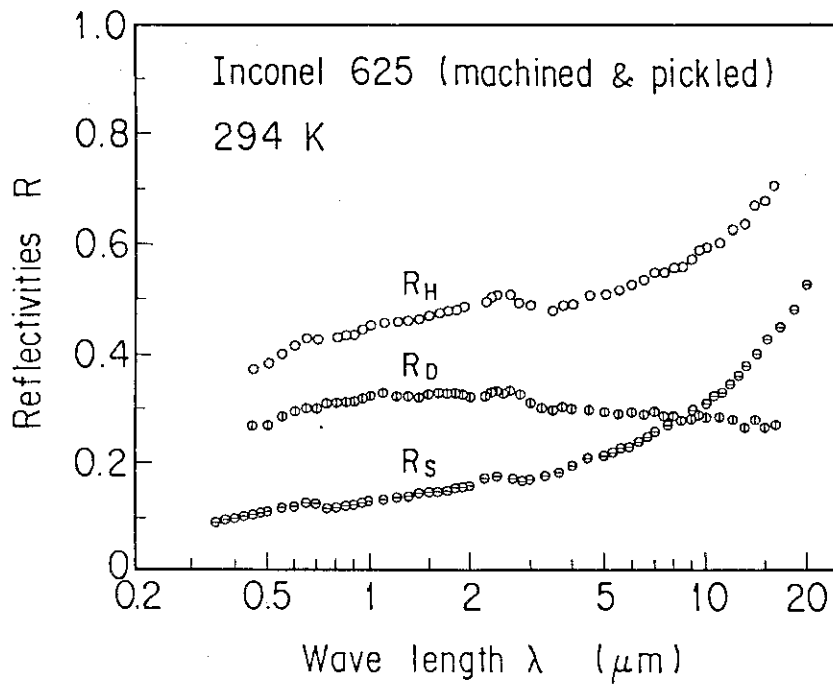


Fig. 3-7 Wavelength dependence of reflectivities for machined & pickled Inconel 625.

(R_S : Specular reflectivity, R_D : Diffuse reflectivity)
(R_H : Hemispherical reflectivity)

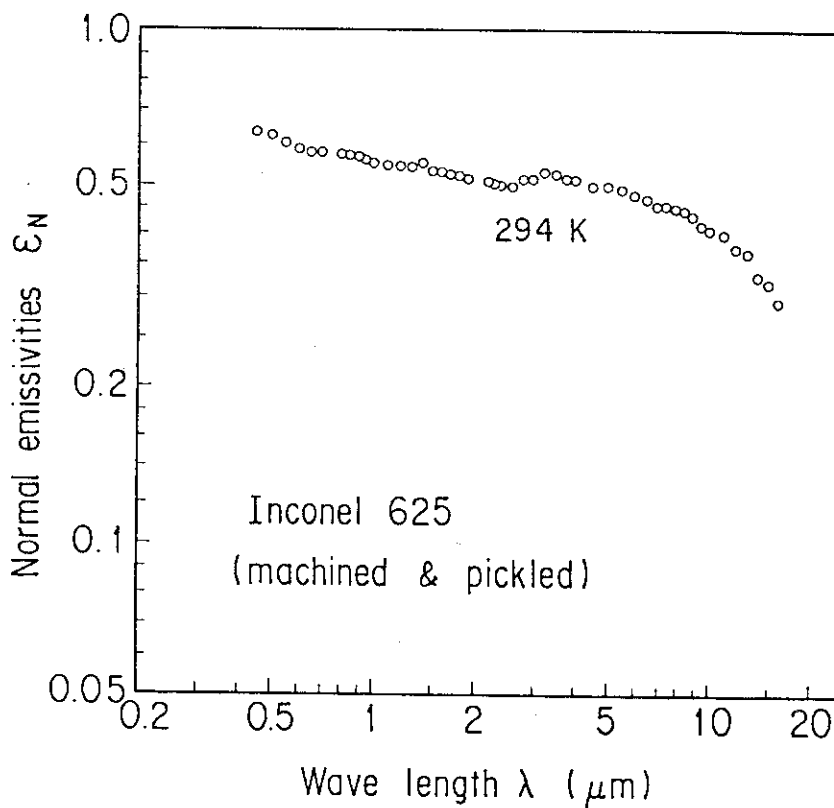


Fig. 3-8 Wavelength dependence of normal emissivity for machined & pickled Inconel 625.

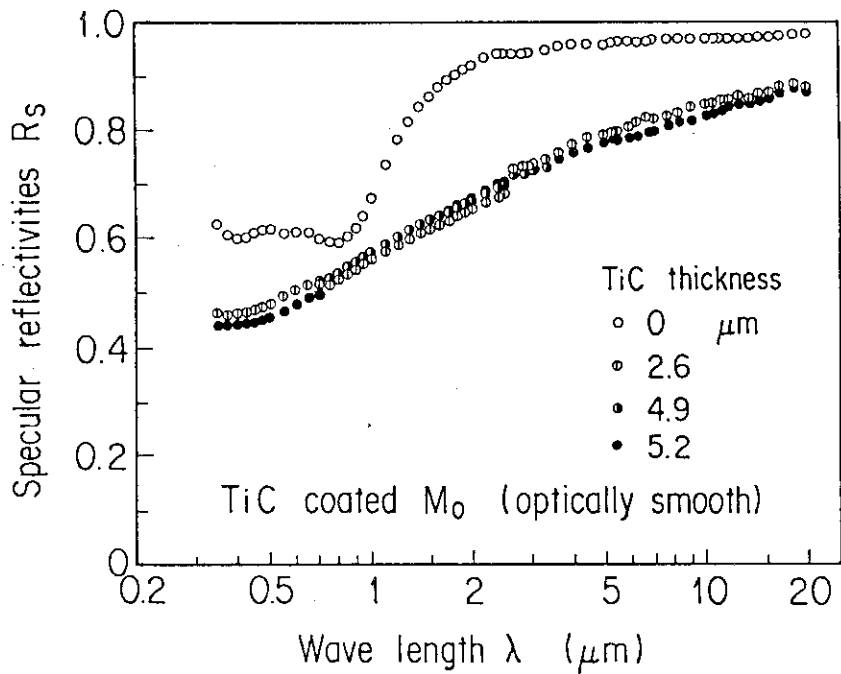


Fig. 3-9 Wavelength dependence of specular reflectivities for optically smooth TiC-coated Mo.

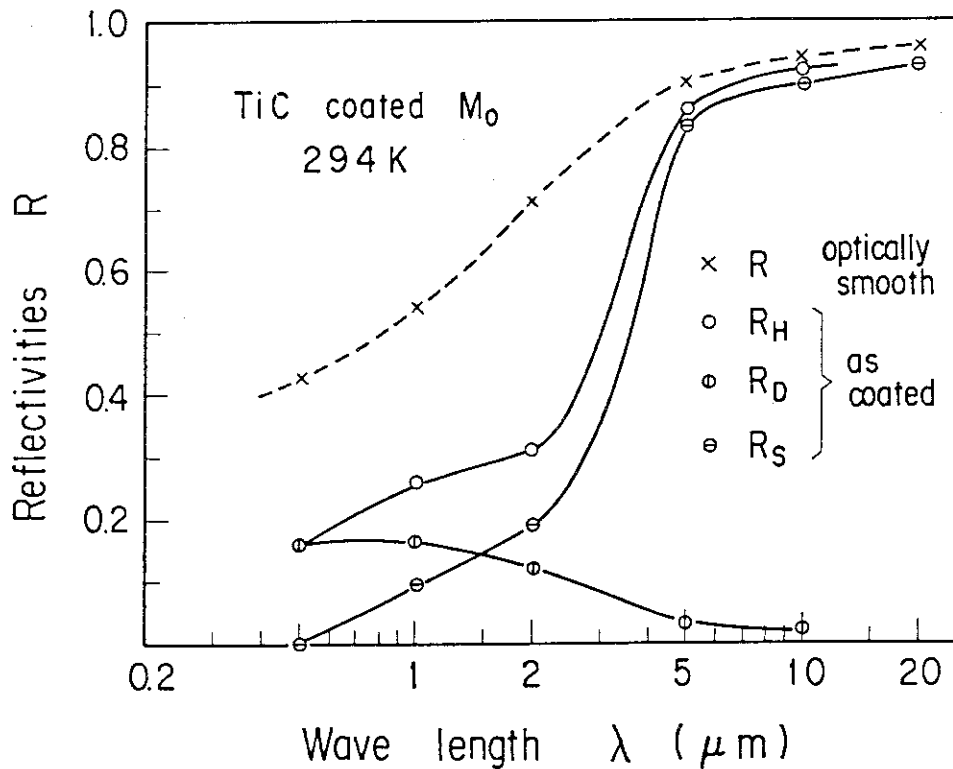


Fig. 3-10 Wavelength dependence of reflectivities for TiC-coated Mo.

(R_S : Specular reflectivity, R_D : Diffuse reflectivity)
 (R_H : Hemispherical reflectivity)

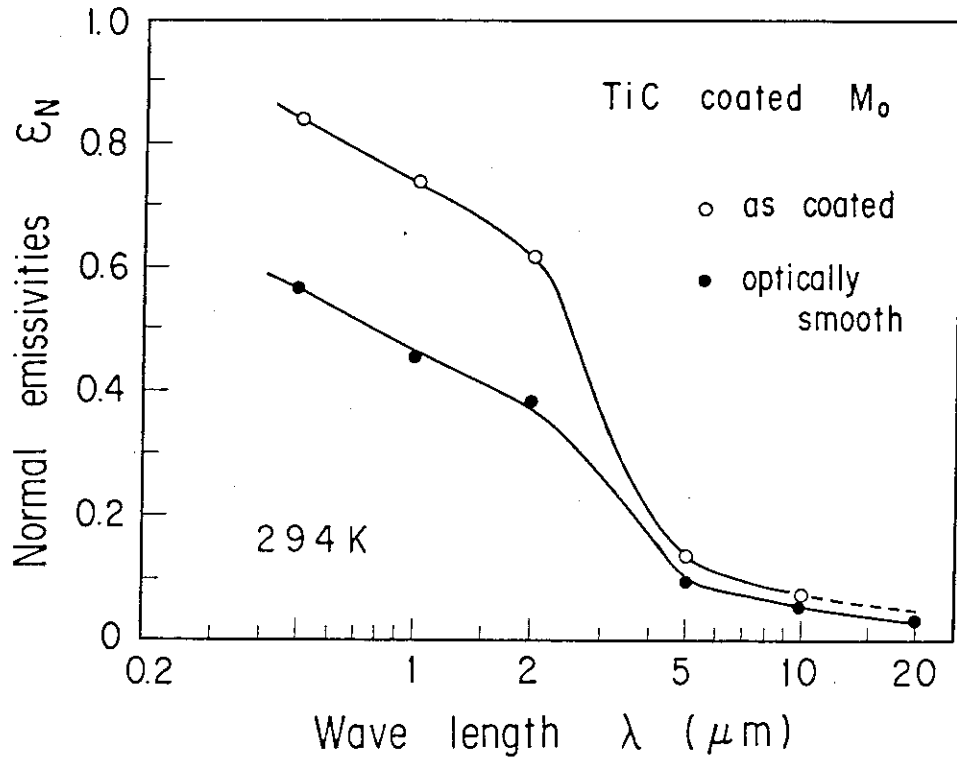


Fig. 3-11 Wavelength dependence of normal emissivity for TiC-coated Mo.

4. 解 析

4.1 理 論

閉空間内のひとつの固体壁から他のひとつの固体壁への輻射伝熱量は、空間内に輻射性気体がない場合、壁表面の輻射性質と壁面相互の位置関係により決定される。金属壁からなる系では、表面の性質は次の3つの原因による。その第1は、金属に固有の性質であり、光学定数によって記述されるものである。その第2は、金属表面に形成される腐食層あるいは被覆層の性質である。その第3は、金属や被覆層の表面あるいは界面の微視的な形状の効果である。これらの原因を考えて表面の性質を知り、壁面の位置関係を計算して輻射伝熱量を評価する問題は、以下のように取り扱える。

(1) 金属電子の性質

金属に固有の光学的性質を代表する光学定数 \hat{n} は、金属内での光の伝播速度を代表する屈折率 n と光の減衰の程度を表わす k からなる複素量として

$$\hat{n} = n - ik \quad (4-1)$$

の形で定義される。 \hat{n} は光の波長 λ と金属の温度 T に依存する量であり、その挙動は金属電子のメカニズムに支配される。熱工学の目的のために、スペクトルの詳細構造には関心をもたないことにすれば、 \hat{n} は赤外域で、次の分散式で与えられる⁽³⁾。

$$\begin{aligned} \hat{n}^2(\lambda, T) &= 1 + \frac{S_0 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2 + i \delta \lambda_0 \lambda} - \frac{\lambda^2}{2 \pi c \epsilon_0} \sum_{k=1}^2 \frac{\sigma_k}{\lambda_k - i \lambda} \\ &= \hat{n}^2(\lambda; S_0(T), \lambda_0(T), \delta(T), \sigma_1(T), \lambda_1(T), \sigma_2(T), \lambda_2(T)) \quad (4-2) \end{aligned}$$

ここで、

\hat{n} : 光学定数, ($= n - ik$)。

n : 屈折率

λ : 真空中における光の波長, (m)

λ_0 : 帯間遷移吸収帯の中心波長, (m)

λ_k : 第 k 番目の伝導電子吸収項における電子の緩和波長, (m)

T : 温度, ($^{\circ}\text{K}$)

S_0 : 帯間遷移吸収帯の強度のパラメータ

δ : 帯間遷移吸収帯の拡りのパラメータ

σ_k : 光学直流電気伝導率 σ_0 の第 k 番目の成分, (S/m)

ϵ_0 : 真空の絶対誘電率, (F/m)

c : 真空中における光の速さ, (m/s)

なる分散式で与えられるとしてよい⁽³⁾。右辺第1項は、真空の比誘電率であり、第2項と第3項はそれぞれ帯間遷移と伝導電子による光吸収の寄与を表わす。とくに、式中の σ_k ($k=1,2$)は直流電気伝導率の成分であり、

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \left\{ -2\pi c \epsilon_0 \operatorname{Im}(\hat{n}^2) / \lambda \right\} \\ &= \sum_{k=1}^2 \sigma_k\end{aligned}\quad (4-3)$$

である。分散式の7種の物性値の大きさと温度依存性は、個々の金属についての実験を通じて解明される。光学定数 \hat{n} が λ と T の連続関数の形で与えられると、金属に固有の性質、すなわち光学鏡面の放射性質は、次に示す(4-4)～(4-13)式によって計算できる。それらの式で、 $\epsilon(\theta_0, \lambda, T)$ は真空中の θ_0 方向への放射率であり、 $\epsilon_H(\lambda, T)$ は半球放射率、 $\epsilon_N(\lambda, T)$ は垂直ふく射率である。これらの値は、前述の金属表面の腐食層あるいは被覆層の効果や、表面あるいは界面の形状の効果が無限小である場合、すなわち、金属表面に起こりうる最小の放射に関する知見を与える。

$$\hat{n}_i = 1, \quad \hat{n}_j = \hat{n}, \quad \hat{\theta}_i = \theta_0 \quad (4-4)$$

$$\hat{n}_i \sin \hat{\theta}_i = \hat{n}_j \sin \hat{\theta}_j \quad (4-5)$$

$$\hat{r}_{sij} = (\hat{n}_j \cos \hat{\theta}_i - \hat{n}_i \cos \hat{\theta}_j) / (\hat{n}_i \cos \hat{\theta}_i + \hat{n}_j \cos \hat{\theta}_j) \quad (4-6)$$

$$\hat{r}_{pij} = (\hat{n}_j \cos \hat{\theta}_i - \hat{n}_i \cos \hat{\theta}_j) / (\hat{n}_j \cos \hat{\theta}_i + \hat{n}_i \cos \hat{\theta}_j) \quad (4-7)$$

$$R(\theta_0, \lambda, T) = (|\hat{r}_{sij}|^2 + |\hat{r}_{pij}|^2) / 2 \quad (4-8)$$

$$R_H(\lambda, T) = \int_0^1 R(\theta_0, \lambda, T) d(\sin^2 \theta_i) \quad (4-9)$$

$$R_N(\lambda, T) = R(0, \lambda, T) \quad (4-10)$$

$$\epsilon(\theta_0, \lambda, T) = 1 - R(\theta_0, \lambda, T) \quad (4-11)$$

$$\epsilon_H(\lambda, T) = \int_0^1 \epsilon(\theta_0, \lambda, T) d(\sin^2 \theta_i) \quad (4-12)$$

$$\epsilon_N(\lambda, T) = \epsilon(0, \lambda, T) \quad (4-13)$$

ここで、

\hat{n}_i : i から j に入射する場合の、 i 側の光学定数。ここでは、真空または空気側。

\hat{n}_j : 金属の光学定数。

θ_0 : 入射角

r_{sij} : i から j に入射する場合の、光の s 偏光成分の Fresnel の反射係数。

r_{pij} : i から j に入射する場合の、光の p 偏光成分の Fresnel の反射係数。

(2) 表面被覆層の性質

金属の実在表面には多少とも油膜、酸化物などの汚染層が形成される。また、プラスチック・セラミックスなどの層が積極的に被覆されることもある。これらの層が表面のふく射性質に及ぼす効果の大きさは層のふく射透過性の程度によるが、とくにセラミックスについては、(a)吸収性が小さく組織の非均質性に起因するふく射散乱性が重要である Al_2O_3 , ZrO_2 などの白いセラミックス、(b)吸収性が高く吸収係数の大きさがふく射性質を支配する Si_3N_4 , SiC などの黒いセラミックス、そして(c)高い電気伝導率をもち、ふく射性質については金属として扱ってよい TiC , TiN などの伝導性セラミックスに分けてとり扱える。その詳細は、(a)、(b)については文献〔9〕に、(c)については文献〔7〕に示されている。

第3章で述べたように、 TiC のCVD被覆面では層厚さが $2\mu\text{m}$ の程度でもふく射の透過性はまったくなく、基板の Mo の性質は現れないので、そのふく射性質は TiC の本来の性質に基

づく(c)のタイプのものである。すなわち、TiC被膜面においてもそのふく射性質は M_0 におけると同様に遷移金属の光学定数分散式(4-2)で代表される。

(3) 表面形状の効果

表面あるいは界面の微視的な形状の効果については、実際の熱設計に有用な関係式は全くない。その主な理由は、表面や界面の形状が多様であり、代表的な形状モデルについて理論的に計算し、あるいは実験しても、わずかに異なる他の面では、それが有効ではないという点にある。現在の段階では、 $\epsilon_N(\lambda, T)$ を測定してそれを実験式の形で整理し、さらに $\epsilon_H(\lambda, T)$ に等しいとみて用いるのが最善と考えられる。粗面では、輻射や反射の角度依存性は鏡面の場合に比べて小さいため、その誤差の範囲は鏡面の場合の $(\epsilon_H - \epsilon_N)$ から評価出来る。

(4) 輻射伝熱量の計算

輻射伝熱量の計算は、例えば温度が T_1, T_2 ($T_1 > T_2$) である2つの無限平板間の伝熱量を評価する場合、次の様な方法で行なうことが出来る。まず、考えられる最大の伝熱量 q_{\max} [W/m^2] を黒体面間の場合について計算する。

$$q_{\max} = \sigma_{SB} (T_1^4 - T_2^4) \quad (4-14)$$

ここで、

σ_{SB} : ステファンボルツマン定数

次に、式(4-2)~(4-8), (4-11), (4-12)で計算される光学鏡面の ϵ_H を用いて考えられる最小の伝熱量 q_{\min} を評価する。

$$q_{\min} = \int_0^{\infty} \frac{E_B(\lambda, T_1) - E_B(\lambda, T_2)}{\frac{1}{\epsilon_{H1}(\lambda, T_1)} + \frac{1}{\epsilon_{H2}(\lambda, T_2)} - 1} d\lambda \quad (4-15)$$

$$E_B(\lambda, T) = (2\pi hc^2 / \lambda^5) / \left\{ \exp(hc / \lambda k_B T) - 1 \right\} \quad (4-16)$$

ここで、

E_B : 黒体の輻射能

h : プランク定数

c : 真空中における光速

k_B : ボルツマン定数

高温の ϵ_H が未知の場合には、室温の値で代用すれば安全側の評価となる。最後に、実在面の伝熱量 q の最確値の推定)を次の手順で行なう。実在面の q は、必ず q_{\max} と q_{\min} の間にある。実際の表面に近い試料を用いて測定した ϵ_N を ϵ_H に等しいと仮定して、(4-15)~(4-16)式の計算を行なうことにより実在面の q が近似的に求められる。また、その誤差の範囲は、鏡面の場合の $(\epsilon_H - \epsilon_N)$ から評価出来る。

4.2 スペクトルの解析

4.1章の理論に基づいて、光学鏡面についての実験スペクトルを解析する。それは、次の(4-17)および(4-18)式を解いて式(4-2)の7種の物性値を求める問題である。

$$\Delta(\lambda_i) = \left\{ E_{\text{Ncal}}(\lambda_i; S_0, \lambda_0, \delta, \sigma_1, \lambda_1, \sigma_2, \lambda_2) - \epsilon_{\text{Nexp}}(\lambda_i) \right\} / \epsilon_{\text{Nexp}}(\lambda_i) \quad (4-17)$$

$$\delta \sum_i W_i(\lambda_i) \Delta^2(\lambda_i) = 0 \quad (4-18)$$

これらの2式を、最急降下型非線型最適化法を用いて解く。使用したプログラムの概要を、図4-1に示す。スペクトルの解析は、M₀とInconel 625について行なう。

M₀については、室温のε_Nから(4-2)式の7種の物性値の室温での値を求め、それをもとにして高温のε_Nのふるまいを調べる。Inconel 625については、室温のε_Nだけを解析する。解析の結果を次に示す。

M₀の場合、分散式(4-2)式を、次の(4-19)式の形で見るとき、S₀, λ₀, δ, σ₁/λ₁, λ₂の5種の物性値は温度によらず、表4-1の値をとる。

$$\hat{n}(\lambda) = \hat{n}(\lambda; S_0, \lambda_0, \delta, \sigma_1/\lambda_1, \lambda_2, \sigma_1, \sigma_2) \quad (4-19)$$

また、σ₁, σ₂の2種だけが温度に依存して、図4-3のようにふるまう。そこで、σ₁(T), σ₂(T)をそれぞれ、

$$\sigma_1 = 1 / (A_1 + B_1 T + C_1 T^2) \quad (4-20)$$

$$\sigma_2 = 1 / (A_2 + B_2 T) \quad (4-21)$$

なる実験式で表わすことにすると、A₁, B₁, C₁, A₂, B₂は、表4-1に示す値になる。(4-20)式および(4-21)式は、図4-2の実線を表わす。

Inconel 625の場合には、帯間遷移の寄与は考えなくてよいので、 \hat{n} は次式で表わされる。

$$\hat{n}(\lambda) = \hat{n}(\lambda; \sigma_1, \lambda_1, \sigma_2, \lambda_2) \quad (4-22)$$

その物性値の室温での値は、表4-2に示す。

これらの関係を用いて、M₀およびInconel 625の光学鏡面の実験スペクトルを表わしたものを、図3-1、図3-2、図3-5および図3-6に実線で示した。

4.3 全輻射率と輻射伝熱量の計算

今までの実験と解析を通じて、金属材料の輻射性質のうち、最大の伝熱量q_{max}および最小の伝熱量q_{min}の評価が可能になった。

そこで、まず、半球輻射率ε_H(λ, T)と全半球輻射率ε_{Htotal}(T), 全垂直輻射率ε_{Ntotal}(T)の計算を行なう。ε_H(λ, T)は、(4-2)~(4-13)式を順次用いて計算できる。更に、ε_{Htotal}(T)およびε_{Ntotal}(T)は、次式を用いて計算できる。

$$\epsilon_{\text{Htotal}}(T) = \int_0^{\infty} \epsilon_{\text{H}}(\lambda, T) E_{\text{B}}(\lambda, T) d\lambda / \sigma_{\text{SB}} T^4 \quad (4-23)$$

$$\epsilon_{\text{Ntotal}}(T) = \int_0^{\infty} \epsilon_{\text{N}}(\lambda, T) \left\{ E_{\text{B}}(\lambda, T) / \pi \right\} d\lambda / (\sigma_{\text{SB}} T^4 / \pi) \quad (4-24)$$

図4-3~図4-5に計算結果を示す。図4-3は、M₀光学鏡面の半球輻射率ε_H(λ, T)である。図4-4は、Inconel 625光学鏡面の半球輻射率ε_H(λ, 300°K)である。また、図4-5は、上記2式を用いて計算した、M₀とInconel 625の全輻射率(ε_{Ntotal}およびε_{Htotal})である。Inconel 625のε_{Htotal}(T)の計算には、室温のε_H(λ, T)を用いた。

次に、輻射率の温度・波長依存性と輻射伝熱量の関係を考える。例として、図4-6に示す無

限平板間輻射伝熱のモデルを考える。計算は、次の3ケースについて行なう。波長・温度依存性を厳密に考慮した場合 (case A)、波長依存性を考えずに全半球輻射率 $\epsilon_{H\text{total}}(T)$ を用いる場合 (case B)、および波長・温度依存性を無視して定数を用いる場合 (case C) の3ケースの輻射伝熱量 q 、 q' 、 q'' は、次式で表わされる。

Case A

$$q = \int_0^{\infty} \frac{E_B(\lambda, T_1) - E_B(\lambda, T_2)}{\frac{1}{\epsilon_{H1}(\lambda, T_1)} + \frac{1}{\epsilon_{H2}(\lambda, T_2)} - 1} d\lambda \quad (4-25)$$

Case B

$$q' = \frac{\sigma_{SB}(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_{H1\text{total}}(T_1)} + \frac{1}{\epsilon_{H2\text{total}}(T_2)} - 1} \quad (4-26)$$

Case C

$$q'' = \frac{\sigma_{SB}(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_{H1\text{total}}} + \frac{1}{\epsilon_{H2\text{total}}} - 1} \quad (4-27)$$

ここでは、上記3ケースの比較は、(4-25)~(4-27)式を黒体面間の輻射伝熱量 $q_{\text{Blackbody}}$ で正規化した輻射伝熱量 q^* を用いて行なう。

$$q_{\text{Blackbody}} = \sigma_{SB}(T_1^4 - T_2^4) \quad (4-28)$$

Case AおよびCase Bでは、輻射率は光学鏡面の値を用いる。Case Cで、 $\epsilon_{H1\text{total}}(M_0) = 0.1$ 、 $\epsilon_{H1\text{total}}(T_i\text{C被覆}M_0) = 0.5$ 、 $\epsilon_{H2\text{total}}(\text{Inconel 625}) = 0.25$ と仮定する。 M_0 面とInconel 625面間の輻射伝熱量の関係を、図4-7に示す。また、 $T_i\text{C被覆}M_0$ 面とInconel 625面間の輻射伝熱量の関係を、図4-8に示す。

これらの図から、定性的には低温側では、Case CはCase BやCase Aよりも大きく、伝熱量を過大評価することがわかる。高温側では、この逆に過少評価である。また、温度依存性のみを考慮したCase Bは、波長・温度依存性を考慮したCase Aよりも小さい。以上から、輻射伝熱量を精度よく評価するためには、輻射率の波長および温度依存性を考慮する必要があることがわかる。

Table 4-1 Dispersion parameters of Mo.

| | | |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| S_0 | 44.5 | |
| λ_0 | 0.318×10^{-6} | m |
| δ | 0.527 | |
| σ_1/λ_1 | 9.34×10^{11} | Sm^{-2} |
| λ_2 | 0 | m |
| A_1 | 1.89×10^{-7} | Ωm |
| B_1 | -3.47×10^{-10} | ΩmK^{-1} |
| C_1 | 5.85×10^{-13} | ΩmK^{-2} |
| A_2 | 5.12×10^{-7} | Ωm |
| B_2 | 5.65×10^{-9} | ΩmK^{-1} |

Table 4-2 Dispersion parameters of Inconel 625.

| | | |
|----------------------|------------------------|------------------|
| σ_1 | 0.550×10^6 | Sm^{-1} |
| λ_1 | 1.20×10^{-6} | m |
| σ_2 | 0.139×10^6 | Sm^{-1} |
| λ_2 | 0.285×10^{-6} | m |
| σ_1/λ_1 | 4.58×10^{11} | Sm^{-2} |
| σ_2/λ_2 | 4.92×10^{11} | Sm^{-2} |
| σ_0 | 0.689×10^6 | Sm^{-1} |

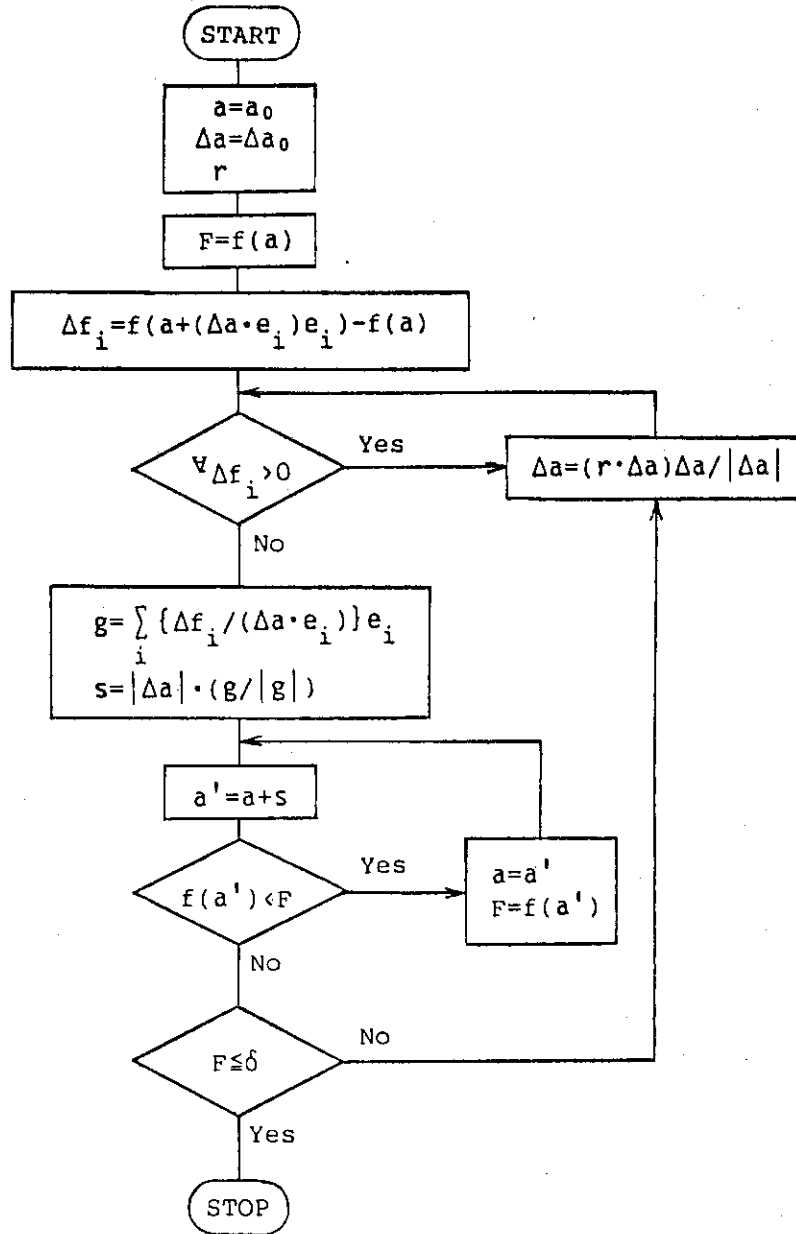


Fig. 4-1 Flow chart of least squares method to obtain dispersion parameters.

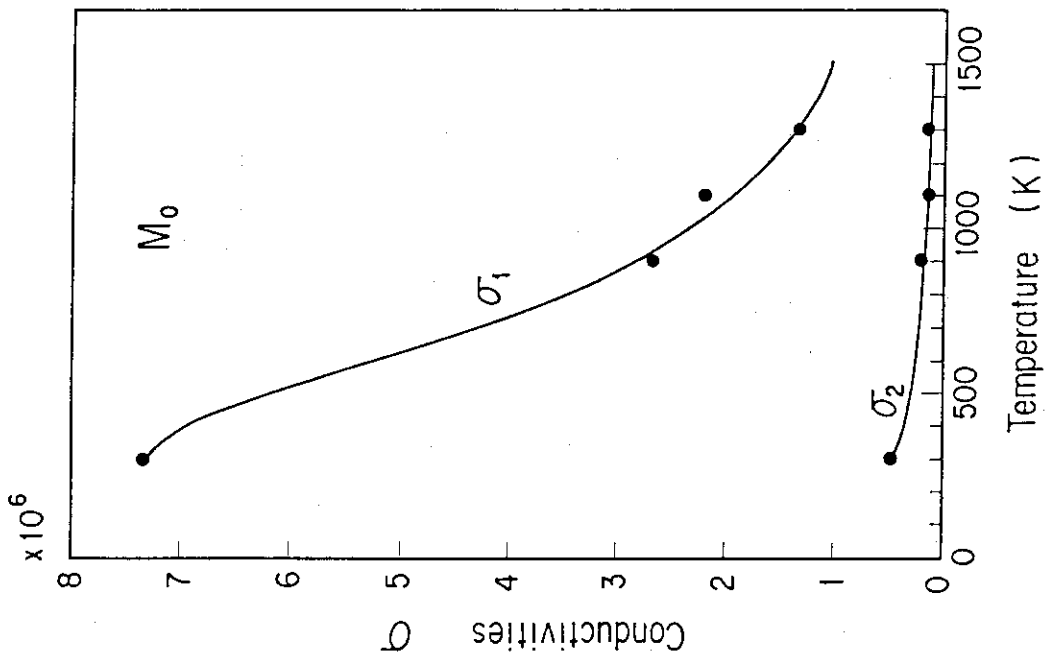


Fig. 4-2 Temperature dependence of conductivities σ_1 , σ_2 for Mo.

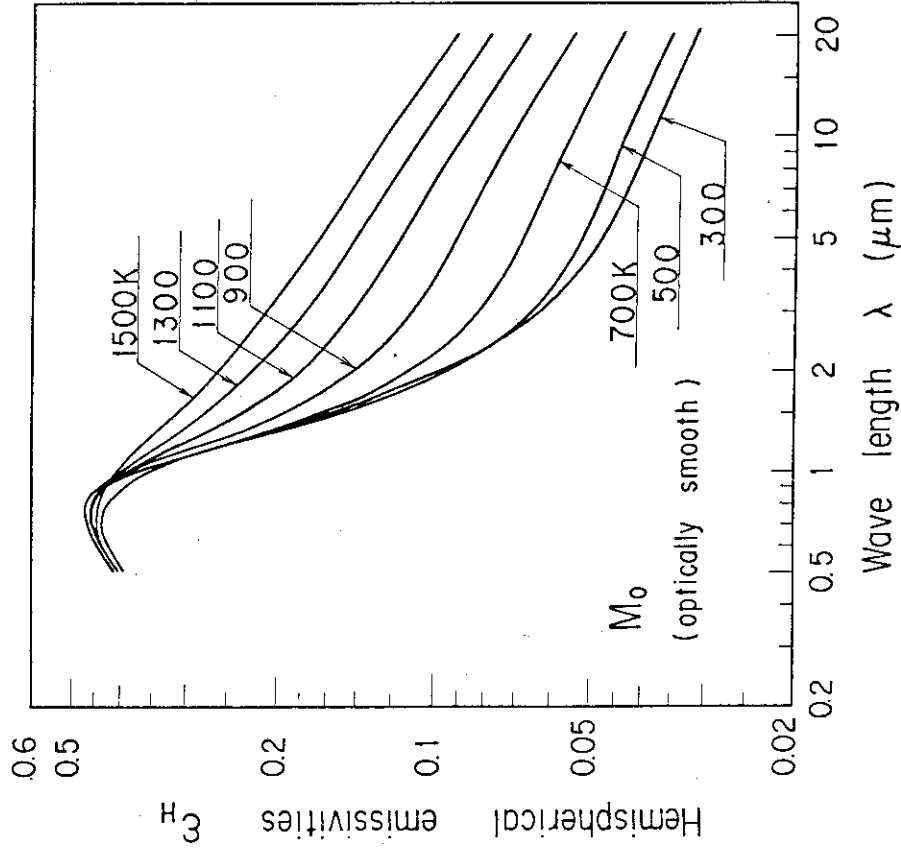


Fig. 4-3 Wavelength dependence of calculated hemispherical emissivities for optically smooth Mo.

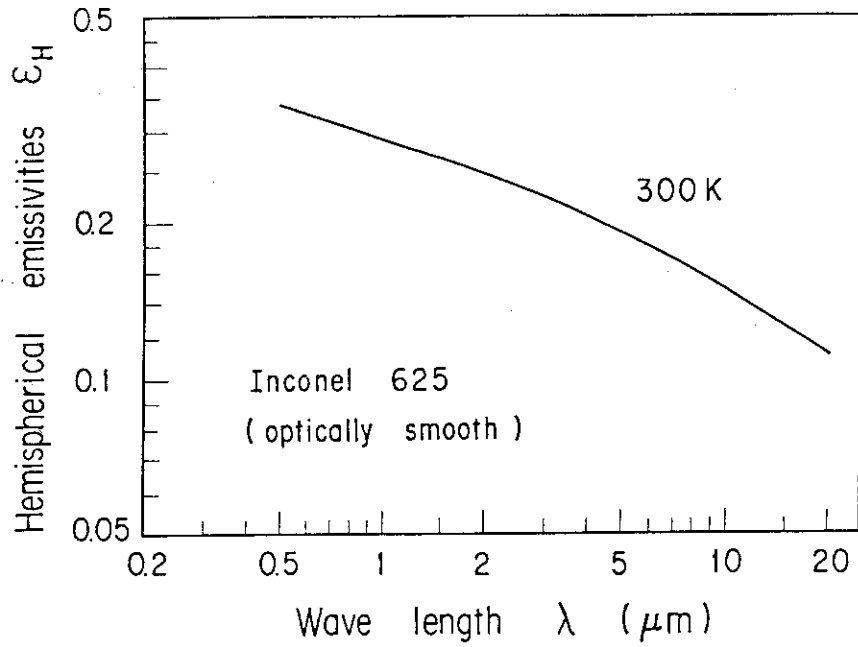


Fig. 4-4 Wavelength dependence of calculated hemispherical emissivity for optically smooth Inconel 625.

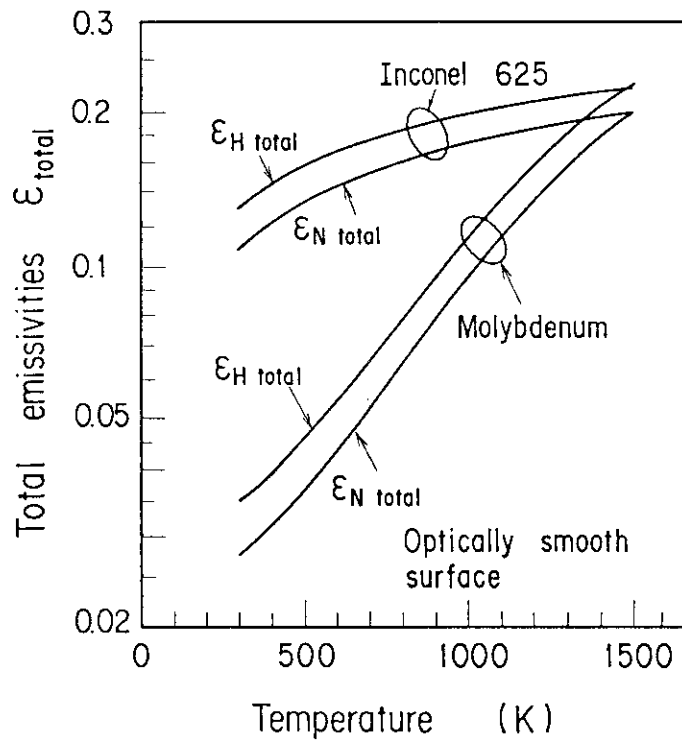


Fig. 4-5 Temperature dependence of calculated total emissivities for optically smooth Mo and Inconel 625.

$\left(\begin{array}{l} \epsilon_{H \text{ total}}: \text{ Hemispherical total emissivity} \\ \epsilon_{N \text{ total}}: \text{ Normal total emissivity} \end{array} \right)$

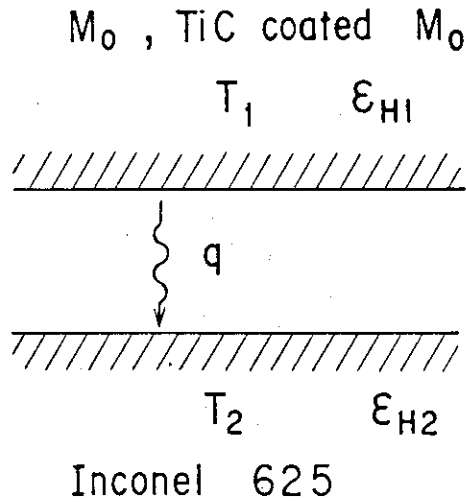


Fig. 4-6 Model of radiative heat transfer.

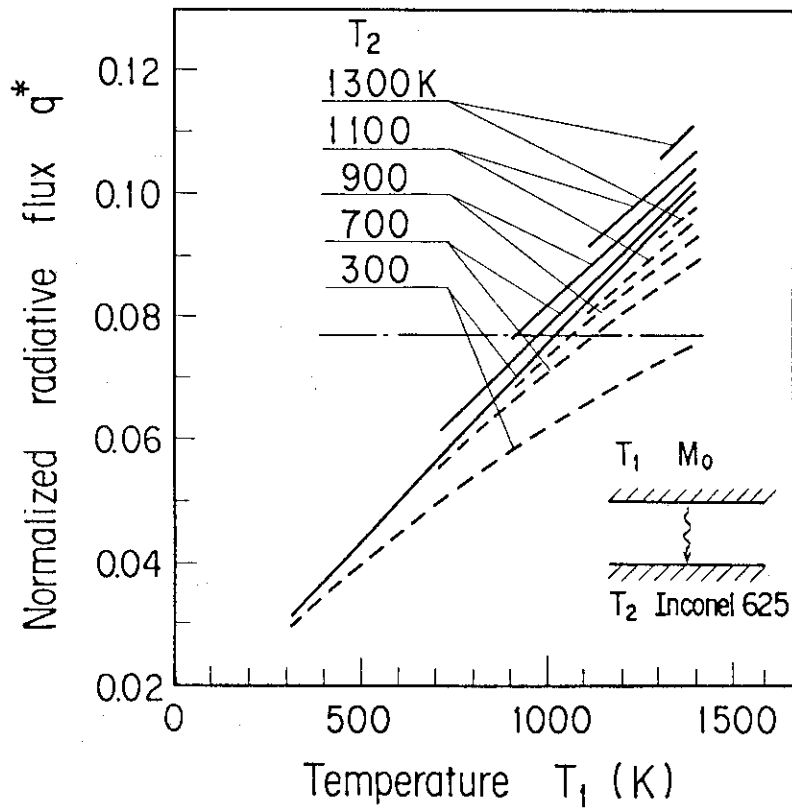


Fig. 4-7 Dependence of radiative heat transfer on emissivity characteristics.

(——— $\epsilon(\lambda, T)$, - - - - $\epsilon(T)$
 - . - . $\epsilon = \text{const}$, $\epsilon_1 = 0.1$, $\epsilon_2 = 0.25$)

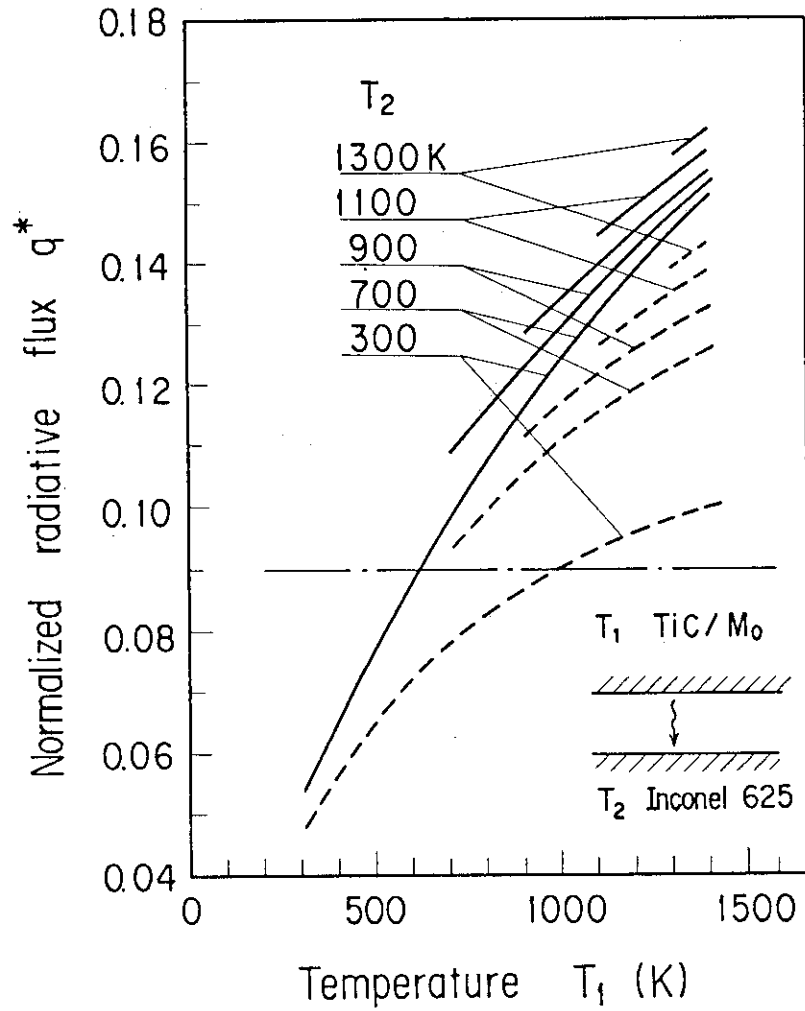


Fig. 4-8 Dependence of radiative heat transfer on emissivity characteristics.

(— $\epsilon(\lambda, T)$, - - - $\epsilon(T)$
 - · - $\epsilon = \text{const}$, $\epsilon_1 = 0.5$, $\epsilon_2 = 0.25$)

5. お わ り に

JT-60の第1壁材料であるInconel 625, M_0 , TiC 被覆 M_0 について, 輻射率スペクトルおよび反射率スペクトルの測定および解析を行ない, 次の結論を得た。

- (1) M_0 の光学鏡面の全輻射率は, 大きな温度依存性を示しており, 0.035 (常温) ~ 0.18 (1300°K) の値である。
- (2) Inconel 625の光学鏡面の全輻射率は, 温度依存性が小さく, 0.13 (常温) ~ 0.21 (1300°K) の値である。
- (3) TiC 被覆 M_0 の光学鏡面の全輻射率は, 常温の値のみであるが, 0.053である。また, 数 μm の TiC 被覆があれば, 基板の影響は無視出来る。
- (4) 実機表面の全輻射率は, 常温の値のみであるが, 0.35 (Inconel 625酸洗面), 0.124 (M_0 電解研磨面), 0.073 (TiC 被覆面)であり, 光学鏡面の値に比較して, 1.4 ~ 3.5倍大きい。
- (5) 輻射伝熱量を精度良く行なうためには, 輻射率の波長および温度依存性を考慮したモデルが必要である。

謝 辞

本研究に御協力いただいた京都大学の関係者の皆様に感謝致します。 TiC 被覆を行なって頂いた住友電工(株)の皆様に感謝致します。また, 日本原子力研究所燃料工学部材料物性研究室の田中三雄氏および浜田省三氏には, M_0 材の提供および TiC 被覆厚さの測定に対し感謝致します。最後に, 本報告書をまとめるにあたり, 磯康彦核融合研究センター所長, 苫米地顕部長, 吉川允二大型トカマク開発部長, 飯島勉次長, 太田充JT-60第1開発室長およびJT-60第1開発室の皆様に感謝致します。

5. お わ り に

JT-60の第1壁材料であるInconel 625, M_0 , TiC 被覆 M_0 について、輻射率スペクトルおよび反射率スペクトルの測定および解析を行ない、次の結論を得た。

- (1) M_0 の光学鏡面の全輻射率は、大きな温度依存性を示しており、0.035(常温)~0.18(1300°K)の値である。
- (2) Inconel 625の光学鏡面の全輻射率は、温度依存性が小さく、0.13(常温)~0.21(1300°K)の値である。
- (3) TiC 被覆 M_0 の光学鏡面の全輻射率は、常温の値のみであるが、0.053である。また、数 μm の TiC 被覆があれば、基板の影響は無視出来る。
- (4) 実機表面の全輻射率は、常温の値のみであるが、0.35(Inconel 625酸洗面), 0.124(M_0 電解研磨面), 0.073(TiC 被覆面)であり、光学鏡面の値に比較して、1.4~3.5倍大きい。
- (5) 輻射伝熱量を精度良く行なうためには、輻射率の波長および温度依存性を考慮したモデルが必要である。

謝 辞

本研究に御協力いただいた京都大学の関係者の皆様に感謝致します。 TiC 被覆を行なって頂いた住友電工(株)の皆様に感謝致します。また、日本原子力研究所燃料工学部材料物性研究室の田中三雄氏および浜田省三氏には、 M_0 材の提供および TiC 被覆厚さの測定に対し感謝致します。最後に、本報告書をまとめるにあたり、磯康彦核融合研究センタ所長、苫米地顕部長、吉川允二大型トカマク開発部長、飯島勉次長、太田充JT-60第1開発室長およびJT-60第1開発室の皆様に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) IAEA Technical Committee Meeting on Operating Plans for Large Tokamak Experiments, Jan 16 ~ 20, 1984, Princeton.
- (2) 中村博雄・清水正亜・榎田道夫・清水徹・宮内康行・太田充, JAERI-M 84-062 (1984) . .
- (3) 牧野俊郎・川崎博也・国友孟, 日本機械学会論文集, B 47-421 (1981-9), 1818.
- (4) Makino, T., Kishida, R., Kawasaki, H. and Kunitomo, T., Bull. J S M E, 23-185 (1980-11), 1835.
- (5) 牧野俊郎・国友孟・森敏樹, 日本機械学会論文集, B 49-441 (1983-5), 804.
- (6) 国友孟・牧野俊郎, 高温学会誌 Vol. 7, No. 2 (1981), p 45.
- (7) 牧野俊郎・木下博文・小林義直・国友孟, 第21回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1984-5), p 367.
- (8) Shafey, H. M., Tsuboi, Y., Fujita, M., Makino, T. and Kunitomo, T., A I A A J., 20-12 (1982-12), 1747.
- (9) 牧野俊郎・阪井一郎・木下博文・国友孟・日本機械学会論文集, B50-452, (1984-4), 1045.
- (10) Ishimaru, A., Wave Propagation and Scattering in Random Media, Vol. 1, (1987), 191, Academic Press.
- (11) Siegel, R. and Howell, J. R., Thermal Radiation Heat Transfer, 2nd Ed., (1981), 40, Hemisphere Pub. Co.

付 録 Ni, Co, Cr, Mo, Ta, W, TiC, TiN の輻射率 ^{(6),(7)}

ここでは、牧野・国友によって現在までに行なわれた光学鏡面の輻射率の中で、核融合装置第1壁材（特に、リミタやダイバータ板）に関係が深いと思われるものを紹介する。詳細は、文献〔6〕、〔7〕を参照されたい。

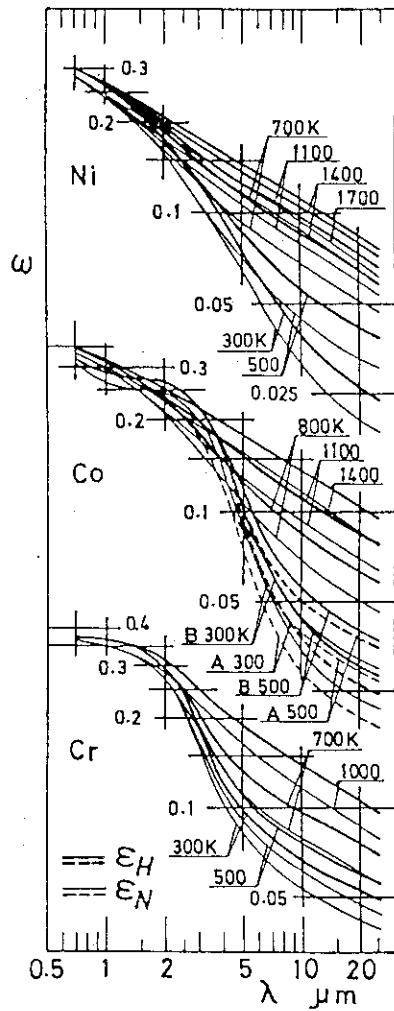


Fig. A-1 Wavelength dependence of calculated emissivities for optically smooth Ni, Co, Cr. (Taken from ref. [6])

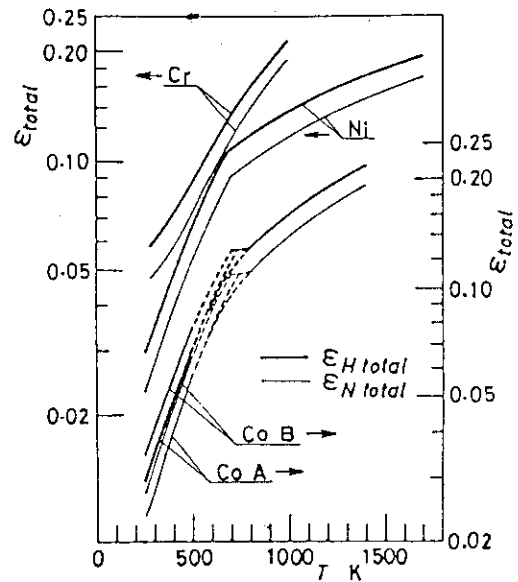


Fig. A-2 Temperature dependence of calculated total emissivities for optically smooth Ni, Co, Cr. (Taken from ref. [6])

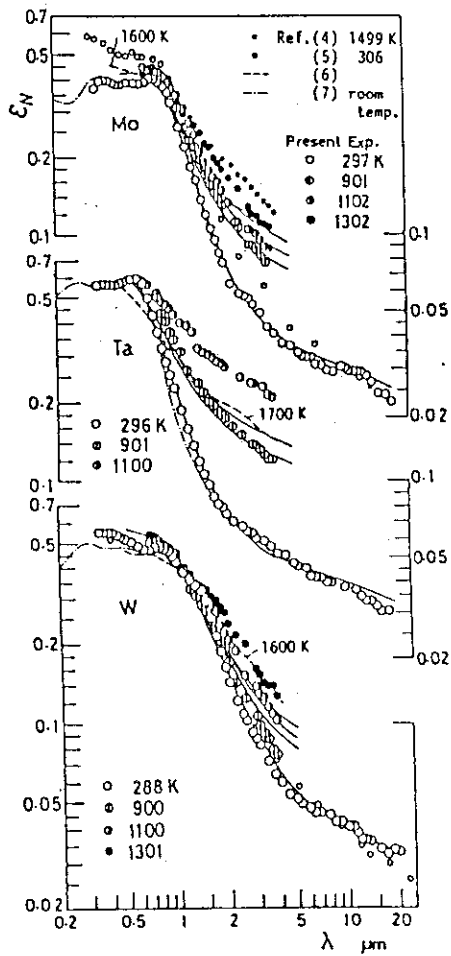


Fig. A-3 Wavelength dependence of calculated normal emissivities for optically smooth Mo, Ta, W. (Taken from ref. [7])

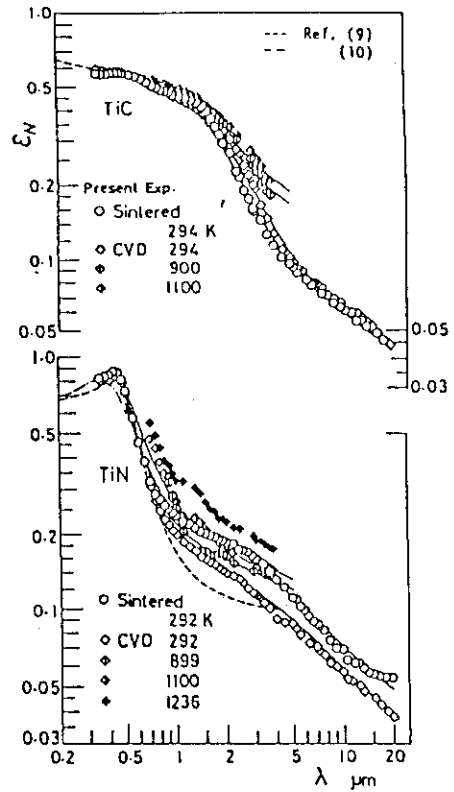


Fig. A-4 Wavelength dependence of calculated normal emissivities for optically smooth TiC, TiN. (Taken from ref. [7])

Fig. A-5 Temperature dependence of calculated total emissivities for optically smooth TiC, TiN, Mo, Ta and W. (Taken from ref. [7])

