

HTTR炉内温度測定法の検討

Investigation of Temperature Measurement Method in HTTR Core

富本 浩 濱本 真平 栄尾 大輔 植田 祥平
梅田 政幸 西原 哲夫

Hiroshi TOMIMOTO, Shinpei HAMAMOTO, Daisuke TOCHIO
Shohei UETA, Masayuki UMEDA and Tetsuo NISHIHARA

大洗研究開発センター
高温工学試験研究炉部

Department of HTTR
Oarai Research and Development Center

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

H T T R 炉内温度測定法の検討

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 高温工学試験研究炉部

富本 浩[※]・濱本 真平・柄尾 大輔⁺・植田 祥平
梅田 政幸・西原 哲夫

(2009年4月6日受理)

高温工学試験研究炉（H T T R）は、1998年7月に初装荷燃料を装荷し、同年11月に臨界に達した。その後、出力上昇試験や安全性確認試験等の運転が実施され、高温ガス炉技術の基盤となる運転データの蓄積を行っている。さらに、高温ガス炉の高度化に向けて、次期中期計画で炉内温度測定の実施を考えている。

本報告は、燃料限界照射試験時の燃料温度を想定して適用可能な測定法の検討を実施した。

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

* 出向職員

+ 敦賀本部高速増殖炉研究開発センタープラント保全部

Investigation of Temperature Measurement Method in HTTR Core

Hiroshi TOMIMOTO*, Shinpei HAMAMOTO, Daisuke TOCHIO[†], Shohei UETA,
Masayuki UMEDA and Tetsuo NISHIHARA

Department of HTTR
Oarai Research and Development Center, Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received April 6, 2009)

HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor) loaded the first driver fuel in July 1998 and reached first criticality state in November 1998. After power-up test, HTTR has been conducting safety demonstration test and sequentially acquiring basic technical data of high temperature gas cool reactor (HTGR). In addition, temperature measurement inside the reactor is planed in the next midterm plan to upgrade the HTTR technology.

This report describes the investigation result of fuel temperature measurement method which is applicable to critical irradiation test.

Keywords: HTGR, HTTR, Block-type Fuel, Core Temperature Measurement, Temperature Monitor, Thermo-couple

* Research Staff on Loan

[†] Plant Maintenance Engineering Department, Fast Breeder Reactor Research and Development Center, Tsuruga Head Office

目 次

1. はじめに	1
2. オンライン温度計測の検討	2
2.1 H T T R 燃料体の概要と温度測定箇所	2
2.2 温度測定箇所の環境条件	2
2.3 オンライン温度計測と環境条件への適用検討	3
2.4 熱電対の構造	7
3. オフライン温度測定方法の検討	9
3.1 合金線材の選定	9
3.2 合金線材の組成による温度測定点	10
3.3 温度モニターの構造	11
4. まとめ	12
謝辞	12
参考文献	13

Contents

1. Introduction	1
2. Investigation of on-line temperature measurement method	2
2.1 Structure of HTTR fuel and temperature measurement part	2
2.2 A condition of temperature measurement part	2
2.3 Investigation of on-line HTTR fuel temperature measurement method	3
2.4 Structure of thermo couple	7
3. Investigation of off-line temperature measurement method	9
3.1 Investigation of material for high melting point alloy wire	9
3.2 Melting point with carbon composition of alloy wire	10
3.3 Structure of temperature monitor	11
4. Conclusion	12
Acknowledgements	12
References	13

1. はじめに

高温工学試験研究炉（H T T R）は熱出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 850/950°C（定格運転時／高温試験運転時）の低濃縮二酸化ウラン被覆粒子燃料を用いる黒鉛減速ヘリウムガス冷却炉である¹⁾。

H T T R は日本初の高温ガス炉であり、高温の熱の供給、高い固有の安全性などの優れた特徴を有し、高温ガス炉の技術基盤の確立と高度化を図るとともに照射試験により高温工学に関する先端的基礎研究が行える原子炉である¹⁾。

高温ガス炉の設計上、炉心内の燃料体等の温度を正確に予測・把握することは、燃料の健全性等の評価上重要である^{2) 3)}。H T T R の燃料体はいわゆるピンインブロック型の燃料体であり、この燃料体を積み重ねて炉心を構成する。H T T R の燃料温度は、炉心設計上、燃焼 330 日における原子炉出口冷却材温度 950°C 運転で燃料コンパクト部分で約 600~1300°C、ブロック部で約 400~1100°C となると予想されている⁴⁾。しかしながら、実際の炉心内で運転中の燃料温度を熱電対で測定することは構造上極めて困難である。

今後、高温ガス炉技術の高度化に向けて、炉内の温度測定技術の開発は極めて重要となる。

本報告は、H T T R 燃料温度の測定方法をオンラインで測定する方法とオフライン（最大温度のみの測定）に分けて検討し、まとめたものである。

2. オンライン温度計測の検討

HTRの炉内温度測定方法の選択において、測定温度が高いこと等環境条件が厳しい上、燃料コンパクト、燃料体等の炉内温度検出部と外部の計器設置場所までの距離が長く、且つ、複雑な構造となっていることから測定方法の選択肢が少ない。ここでは、改めて環境条件を整理し、測定方法を調査した。

2.1 HTR燃料体の概要と温度測定箇所

HTR燃料体の構成を図2.1に示す。

HTR燃料体の被覆燃料粒子は、二酸化ウランの球状燃料核に第1,2,4層を熱分解炭素、第3層に炭化珪素(SiC)の計4層の被覆が施されている。燃料コンパクトは外形約26mm×内径約10mm、高さが約39mmの円筒形状をしており、肉厚部の黒鉛マトリックス中に被覆燃料粒子が分散している。燃料棒は黒鉛スリーブ中に燃料コンパクトを14個挿入し、上下に端栓を施す。燃料体は、中央につかみ孔を配する対辺360mmで高さが580mmの六角柱状黒鉛ブロックの孔に燃料棒を挿入した構造である。

炉心は図2.2炉心配置図にあるように水平方向61個のブロックの内、燃料体30体を第1領域～第4領域に配置し、これを5段積み重ねた構造になっている。また、この領域は、図2.3HTR構造図中、塗りつぶしの部分に配置される。

温度測定の箇所は、上記の燃料体、燃料棒又は燃料コンパクトの表面である。

燃料限界照射の場合には、図2.3に示す様に炉心中央、軸方向中央に配置する黒鉛ブロックを燃料体試料に置き換えることを想定する。

2.2 温度測定箇所の環境条件

下記のHTR炉内環境条件を検討条件とした。

(1) 測定温度

HTRの燃料温度が原子炉設置許可申請書⁵⁾において高温試験運転時の燃料最高温度が工学的安全係数を考慮したシステムティック温度で1492°C⁴⁾⁵⁾また、燃料限界照射試験において燃料最高温度2000°Cとなっている。

ここで、検討対象測定温度としては、より高温の燃料限界照射試験時の燃料最高温度2000°C⁵⁾（燃料コンパクト表面温度）を想定し、測定温度条件とする。

(2) 測定時間

燃料コンパクトが最高温度状態にて200時間。その前後の温度上昇下降を含め、1ヶ月。

(3) 設計炉内圧力

最大4.8MPa

(4) 放射線線量当量

$2 \times 10^{13} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$

(5) 雰囲気

ヘリウム（100%）ガス雰囲気、黒鉛による炭素還元雰囲気。

上記、環境条件の下、下記の検討項目を挙げた。

- ① 2000°Cまでオンライン計測が可能であること。
- ② 放射線照射下での材料脆化
- ③ 高温での黒鉛（炭素）と測定系内の温度検出部や信号経路部等の共存性
- ④ 炭素還元雰囲気
- ⑤ 測定温度変化（ドリフト：高温で熱電能が変化すると温度勾配が顕著な所で熱電能変化に伴う起電力の変化が生じる。）
- ⑥ 燃料コンパクト又は黒鉛部材の表面温度測定性。
- ⑦ 測定点からの距離（約10m）を考慮した製造性。

2.3 オンライン温度計測と環境条件への適用検討

燃料温度測定としては、測定温度の実時間で連続的測定が可能であるオンライン計測は経時変化がわかり有益な情報が得られる。そこで、表2.1に既存のオンライン計測を挙げ、各温度測定方法の測定温度範囲を表2.2に表した。

2000°C付近の高温測定方法として採用の可能性がありそうな熱電温度計（熱電対）について、2.2の項目について検討した。

（1）熱電対素線

熱電対の素線については、下記の3種類を挙げることができる。

- ・タンゲステンレニウム（W/R e）熱電対

1500°C以上の温度測定には、W/R e熱電対が一般的に使用される。WまたはW・Re合金熱電対には表2.3に示す種類がある。そのうち、W-W・26%R e及びW・5%R e-W・26%R eの熱電対が代表的である。W、R e共に融点は3000°C以上であるが、Wが高温で脆くなるので実際には常用2400°Cと言われている。特に空気中あるいは酸化雰囲気中では著しく酸化される。不活性雰囲気で使用できるため、ヘリウムガス雰囲気中で使用可能と考えられる。W・5%R e-W・26%R e熱電対は、機械的強度を改善し、熱起電力特性を直線に近くするために作られたものである。1800°Cを超えると短時間で起電力がドリフトする傾向があると言われている。今回の測定系は、炉内燃料の温度が高く、温度勾配が付いているため、ドリフトが起きやすい条件と考えられる。よって、W/R e熱電対を用いるときには、測温部と周囲温度の勾配をできるだけ少なくする必要がある。

- ・イリジウムロジウム（Ir/R h）熱電対

Ir/R h熱電対は、2000°C付近の高温用熱電対として知られている。表2.4に代表的なものを挙げる。R h 40~60%の範囲のものが知られている。素材が極めて高価で、製造性が低く、工業的にもほとんど利用されていない。

- ・非金属（セラミック、炭素）系熱電対

非金属系熱電対として、炭素系の熱電対が報告されている。表2.5に代表的種類を載せる。非金属系の熱電対は貴金属系等と比較して起電力が大きいのが特長である。炭素系の熱電対は試験レベルで紹介されているもので、実用になっている熱電対は非常に少

なく、実験的に作られているのが大半である。

セラミック熱電対の構造は、保護管内にセラミック棒が挿入された構造のものがあり(図2.4)、電気炉等には利用可能である。繊維質のセラミック炭素繊維の紐を利用した実験が報告⁸⁾されているが、今回の検討においては、測定系の外部までの引き回しを考えるとこの繊維質のセラミックの利用が有効と考えられる。製作時の熱処理や使用時の熱履歴によって起電力の変化が大きいことから、まだ実用化に至っていない。

この3種類の熱電対の内、W/R_e熱電対が現実的な選択であると考えられる。従って、W/R_e熱電対に関して図2.5に示す熱電対素線の以外の構成品について2.2の環境条件の適応性を検討した。

無機絶縁材については、材料の物性値を表2.6及び図2.6に挙げ、無機絶縁材としての特徴を下記に纏めた。高温で電気抵抗が大きい無機絶縁材料として、下記の絶縁材が挙げられる。何れも図2.6にあるように絶縁抵抗は2000°C付近になると数百から1kΩ程度まで低下するが、絶縁が保てる所以熱電対の起電力には影響ないと考えられる。

- BeO (ベリリア)

BeOは融点2550°Cで、密度は3.03g/cm³である。高温で化学的安定性が高く、炭素に還元されにくい。熱伝導度は高いが、電気伝導度は非常に低い。均一な熱膨張性のため、熱衝撃に対して安定である。機械的性質は1600°Cまで常温と殆ど変わらない。高温での圧縮強さが高い。結晶構造は六方晶系で変態はない。毒性があり、吸入すると呼吸困難を起こし、接触により皮膚炎等を起こす。また、高価で入手しにくい。

- MgO (マグネシア)

MgOは融点2800°Cで密度は3.58 g/cm³である。高温で容易に還元され、2300°C～2400°C以上になると蒸発する。還元性雰囲気では1700°C以下でしか使用できず、蒸気圧が高いので真空中でも1600°C～1700°Cが使用限界である。炭素と接触しても1800°Cまでは安定であるが、2000°Cでは炭素や炭化物と急激に反応する。高温焼成による高密度のものは、湿分、酸類に侵されにくい。

- HfO₂ (ハフニア)

HfO₂は融点2777°Cで密度は9.68 g/cm³である。高温用耐熱材料としてよい性質を持っている。高温で安定、化学的にも不活性である。Hfは中性子吸収剤に使用される材料である。

- ThO₂ (トリア)

ThO₂の融点は酸化物の中では最高で3300°Cであり、密度は9.69 g/cm³である。蒸気圧が低いので、真空炉内での使用に適している。しかし、熱伝導率が小さく、熱膨張率が大きいので熱衝撃抵抗が悪い。核原料物質で炉内使用の検討対象としない。これらのことから2.2環境条件にて使用する場合の無機絶縁材の選択は、BeO>MgO>HfO₂、ThO₂の順になると想われる。

シース材については、材料の物性値を表2.7に挙げ、無機絶縁材との共存性を表2.8に黒鉛との共存性を表2.9に纏めた。

・ T a (タンタル)

強固な酸化被膜により独特の外観を呈する密度の高い伸延性のある金属である。400°C以上では大気中の酸素と結合し、この酸化物は徐々に分解し、T a 自体を硬く脆くさせる。同様の変化は窒素と水素においても見られる。HfO₂との共存性データが見つからなかつたが、W/R e 熱電対のT a シースは使用されている。共存性に関して問題ないとと思われる。

・ N b (ニオブ)

柔らかく可鍛性のある金属で、純金属は長く空気中に放置すると薄い酸化被膜を形成する。加熱により急速に酸化するので、加熱加工では酸素放出による脆性を被るので、不活性ガス中での作業が必要である。

・ M o (モリブデン)

高温において強度が高い金属で、高融点、低蒸気圧で優れた成形性を有する。高温、大気雰囲気では酸化によりM o O₃となり昇華による消耗がある。

・ W (タングステン)

Wは、金属中で最高の融点と低い蒸気圧をもつ金属である。タングステンの再結晶温度は中程度の冷間加工を行った場合、約1500°Cと言われている。加工度が大きい場合は、1000°Cあるいはそれ以下に下がってしまう。一般に再結晶すると引張り強さ、延性が低下し非常に脆くなる。

原子炉内への拡散性を評価するため、シース材の蒸気圧を表2.10に無機絶縁材の蒸気圧を表2.11に示した。

先に挙げたシース材については、いずれも使用最高温度2000°Cにおいても蒸気圧が十分低いので問題はないと考えられる。また、絶縁材についても、M g O以外は蒸気圧が低く、2000°Cで使用しても問題ないと考えられる。

熱電対構成材料の耐放射線性については、上記に挙げた熱電対構成品材料の放射性同位元素のデータ及び中性子吸収断面積のデータを表2.12及び表2.13に示す。中性子吸収断面積が小さく、半減期が短い方が良い。

T hは、半減期が長く、核原料物質で炉内使用の検討対象としない。R eとH fは、中性子吸収の値が大きい。本検討においては、絶縁材としてM o、T aが有効な材料と考えられる。

(2) 放射温度計

市販品は検出素子によって表2.14のように分類できる。全放射温度計には熱電形検出素子が使われ広い波長帯の放射線を検知している。測定範囲は中低温域が多い。部分温度放射温度計、単色放射温度計には、光電形検出素子が使われ波長帯域が狭く、温度域は低温から高温に及んでいる。

放射温度計の固有な問題として放射率依存性があるが、市販の放射温度計の精度定格は±1%程度となっており、目盛は黒体炉によって校正する。

放射温度計は、2000°Cという高温でも測定可能であるが、測定系中温度測定箇所と測定系と外との境界まで放射光を遮る構造物がない様にする必要がある。系内での構造物との

共存性の検討が必要なくなるが、原子炉の圧力容器に耐圧、耐熱性圧力境界窓を設けるための開発が必要である。また、温度計本体は耐熱構造ではないので、本体を常温の場所に配置するため、測定系外への信号の取出が必要となる。

H T T R内の燃料温度を測定する場合、離れた場所から測定するため、測定対象箇所が大きくなってしまう。これによる測温対象物の温度分布が変わらないようにする必要がある。測定したい部分を絞って温度測定することはスタンドパイプを改造して放射温度測定を行えるようにする等、技術開発を検討する必要がある。

(3) 热雑音温度計

热雑音はジョンソンノイズと呼ばれており、抵抗体の中で電子の揺らぎにより热雑音電圧が生じ、この2乗平均値が温度と一定の関係にあり(Nyquistの定理)、次式で表される。

$$\bar{e}_n^2 = 4kTRB \quad (2.1)$$

ここに

k : ボルツマン定数, T : 抵抗体の絶対温度

B : 雜音の観測帯域幅, R : 抵抗体の抵抗値

実際には、 B を精密に測定することが困難なので、通常は既知の雑音(比較雑音源)との比較により T を求める。

(例) $B=1\text{MHz}, T=1000\text{K}, R=1\text{k}\Omega$ として $\bar{e}_n^2 = 7.4\mu\text{Vrms}$ (Vrms :交流電圧の実効値) と信号が小さい。

热雑音を利用した温度測定として以下のような方式がある。

- 抵抗比法による热雑音温度測定¹¹⁾¹⁷⁾¹⁸⁾

雑音を利用する方法には、比較雑音源を基準温度に保持するか、あるいは実温度校正が必要で雑音電圧の平衡の操作が面倒で高精度の測定を行うには複雑な操作を必要とし、実用的な温度計としては不向きと言われている。

- ショット雑音^{*}を用いた热雑音温度計¹¹⁾¹⁷⁾¹⁸⁾

ショット雑音を使用する方法は、比較雑音源にショット雑音を用いるもので、基準温度、実温度校正、帯域幅安定性が不要であり、雑音比較のための平衡操作が電子的に出来るので自動測定が可能であり、実用温度計として適している。

このようなことから、ショット雑音を用いた方法が現実的であると考えられる。

热雑音温度計の測温素子として図2.7のような構成となっている。

*ショット雑音: P N接合等、一定電圧閾値から電流が流れ出る時、素子を流れる電流の揺らぎを言う。

測温素子の構成材料は1500°Cから2000°Cの測定を考えた場合、高融点で絶縁物に関しては、微小な電圧測定が要求される事から、高温絶縁性に優れたものを使用する必要がある。式(2.1)から分かるように、センサの抵抗値が大きいほど熱雑音は大きくなることから、測定には大きい抵抗のセンサにするのが良いとされるが、センサ側よりも絶縁物の抵抗が小さくなると絶縁物へ電流が流れてしまう。絶縁物が高温で抵抗が小さくなることから抵抗の大きいセンサを使用する事が出来ないと考えられる。

耐熱性絶縁材として表 2.6 のような酸化物系の絶縁材が挙げられ、BeOが最も適していると考えられるが、2000°C付近では絶縁抵抗が $k\Omega$ オーダーまで低下する。

抵抗線は、高融点金属を使用し、高温では絶縁材との共存性も考慮する必要がある。抵抗線としてW, Mo, Taが挙げられる。抵抗合金線材とBeO及びMgOとの高温に於ける共存性を表 2.8 に示す。

高温用熱雑音温度計は、重要部材である絶縁材に良いものが無く、仮にBeOで絶縁しても高温に於ける絶縁抵抗が低すぎて正確な測定は出来ない。また、比較的絶縁材との共存性が良いTaを使用しても、2000°C付近では、絶縁材と抵抗線が反応して抵抗が変化してしまう可能性がある。このようなことから、燃料温度測定を目的とした高温熱雑音測定は適材を見つけることが困難であると考えられる。

(4) 超音波温度計（固体・気体）¹⁷⁾

物質中の音波の伝搬速度が温度で変化する現象を利用して温度測定する。センサは被測定対象その物を用いる場合と他の物質からなるプローブを挿入する場合がある。何れも物質中を音波が伝わることで測定が可能となるため、高温や放射線の影響がある場所などでも原理的には温度計測が可能である。固体超音波温度センサ(図 2.8)の耐熱性は、使用物質で決まり、固体であるとサファイアやRe等の高融点材料を利用できる。しかし、磁歪振動子部は温度を低くする必要があることから、設置場所によっては振動子を水冷する必要がある。

気体超音波センサ(図 2.9)は、気体そのものがセンサとなり、応答が早く外周壁の熱放射の影響がない等の利点があるが、分解能はあまり良くない。発振素子と受信素子の耐熱性が問題となるため設置場所は限られることが課題である。

2.4 热電対の構造

2.3 ではオンラインHTTR燃料温度計測として最も可能性が高い熱電対の素材を中心に検討を進めた。ここでは、その熱電対の構造案を挙げ、その製造性等を評価した。

熱電対は径が太いと絶縁距離を保持できる。また、素線間での金属拡散速度を遅くする事が出来る。金属拡散が起こると絶縁低下や素線の組成変化等が起り、起電力が変化して正確な温度測定ができなくなる。

(1) 絶縁材充填型

Ta素管中に熱電対の素線（あるいは素線で撲った物）を挿入して絶縁材を充填し、シースを減径加工（エージ・ローラ・ダイス引抜）したものである。エージ・ローラ・ダイス引抜による減径は、素線の位置保持と応答性を良くするために空隙を無くし、熱電対素線は強固に固定され、曲げ加工しても熱電対が断線したり、互いに接触したりしないので、自由に曲げられる事を特長とした熱電対である。Ta等の高融点金属は、高温で酸素、水素、窒素と反応を起こしやすいので、加工は冷間で行い、焼鍛は真空で行う必要がある。その場合は製作コストは高くなる。（図 2.10）

Ta素管中に熱電対の素線を複数挿入して、測温点を複数設けることによって、縦方向

の温度分布を1本の熱電対で測定できるようにする。また、複数化により、炉内での不具合回避のための多重化としても利用可能である。(図 2.11)

(2) 絶縁材充填型(素線シーズ)

①とほぼ同じであるがT aシーズした熱電対を挿入する。絶縁材を充填し、減径加工する。二重管構造とすることにより、素線間の元素移行を防止し、また、内側シーズ間の電位を同じに保つて、高温による絶縁材の絶縁抵抗減少による誤測定(シャントエラー)を防止するシールドドライブ回路を接続できるようにした熱電対である。(図 2.12)

(3) 絶縁管型

T a素管中に熱電対の素線を絶縁管に挿入したもの T aシーズに入れた形状。保護管付き熱電対の保護管を通常セラミックである物をT aとしたものである。コスト的には減径加工が必要ないので安価に製作できる利点を有する。(図 2.13)

3. オフライン温度測定方法の検討

オフライン温度測定方法として予め炉内に入れられた線状高融点合金を原子炉から炉内構造材と共に取り出した後、温度を確認する温度モニター法が考えられ、HTTR原子炉内において1400°C付近で使用することを目的とした温度モニターの開発を行ってきた¹⁹⁾。これを基にここでは2.2の環境条件に使用できる2000°C付近で使用する温度モニターを検討した。

これまで開発した温度モニターは、図3.1に示した概念図のように石英管の中に合金線材が入れられており、石英管内は不活性ガス（アルゴン）で封入した構造である。また、石英管はアルミナホルダーに入っている。温度モニターは融点の異なる合金線材を装荷し、その溶融の有無をX線ラジオグラフ等で確認し、溶けていた合金線材の融点と溶けていなかった合金線材の一番低い融点の間に測定箇所の温度履歴があると判断する。また、温度モニターは燃料コンパクトの中心孔に挿入するか、燃料コンパクト表面から離れたブロックに装荷孔を設け、その温度から燃料表面温度を計算により求めるといった使い方も考えられる。

3.1 合金線材の選定

今回の温度モニターの検討にあたり、2.2の環境条件で使用可能な合金線材用純金属として、融点が1500°Cから2000°Cまでの金属を検討した。一方、封入については、使用温度が石英ガラスの使用可能温度域を越えているため、石英ガラス封入を採用せず、ホルダーに直接装填する方法で高温使用こととする。温度モニターの溶融温度の安定性は、金属表面の酸化度によって左右されると考えられる。2.2に挙げる環境条件には挙げていないが、そのため、本来は酸化に強い貴金属系(Pt, Pd, Rh, Ru等)を基に合金調整するのが望ましい。これら純金属は融点1100°C程度まで利用可能であるが、それ以上の温度ではホルダー材との共存性の問題がある。

一方、最近になって、熱電対や放射温度計の高温定点校正用として金属一炭素共晶点を利用した合金が開発された²⁰⁾²¹⁾²²⁾。この合金は、黒鉛ホルダーからの炭素で純金属が汚染され融点や凝固点に変化がないように、初めから貴金属系の純金属単体の変わりに共晶点が生じる炭素配合し黒鉛ホルダーによる汚染の影響を極力少なくすることで合金を定点物質として使用できるようにしたものである。

使用温度範囲約1500°Cから約2300°Cで開発された金属一炭素共晶合金を表3.1に示す。これら金属一炭素共晶合金の共晶点を利用して温度測定が可能であると考えられる。

今回、金属一炭素共晶合金線材として選択した金属は、全て白金族の金属であり、大気中で酸化しないため、融点の安定性から、温度モニター材として適材であると考えられる。表3.2に選択した金属の物性を載せた。また、高温雰囲気で使用するので、原子炉内の汚染を避けるために蒸発しにくい方がよく、表3.3に示すように使用最高温度2000°Cにおいても蒸気圧が十分低いので問題はないと考えられるが、Pdは他の金属より蒸気圧が高い。また、PdはHTTR炉心燃料でもある燃料コンパクト中の被覆粒子被覆層第三層であるSiCへの反応が懸念されるので、出来ればPd以外の金属を選択し合金を作った方が良いと考えられる。

中性子照射下で使用されるので、中性子吸収断面積が小さく、なるべく反応生成物が純物質

と同じもので半減期も数時間もしくは数日程度の物が良いと考えられる。今回選定した合金線材用金属に関する放射性同位元素及び中性子吸収断面積のデータを表 3.4~3.7 に示す。

表 3.1 に示す合金に使用する純金属は、放射性同位元素に関して反応生成物及び半減期など中性子照射下で使用するにあたって、特に問題にならないと考えられる。

3.2 合金線材の組成による温度測定点

温度モニターとして、Pd-C系合金は図 3.2 に示す状態図²⁴⁾により、1500°Cから 1800°Cまでカーボンの組成比 20~24 原子%で可能である。例として表 3.8 に 1500°Cから 1800°Cまでのカーボン組成比に対応する融点を示す。左側の液相線上の組成も可能であるが、設定できる温度幅が狭い。

Rh-C系合金は図 3.3 に示す状態図²⁴⁾により、1700°Cから 2000°C程度までカーボンの組成比 3.5~15 原子%の組成で可能である。例として表 3.9 に 1700°Cから 1900°Cまでのカーボン組成比に対応する融点を示す。Rh-C系は、左側の液相線の勾配が緩やかなので混合割合を大きくすることができ、温度範囲を広くすることが出来る。また、右側の液相線を利用することで 2000°C付近の温度を測定範囲とすることができます。

Pt-C系は、図 3.4 に示す状態図²⁴⁾により、1738°Cから 2000°C程度までカーボンの組成比 17~22 原子%の組成で可能である。例として表 3.10 に 1738°Cから 2000°Cまでのカーボン組成比に対応する融点を示す。液相線の勾配が急なので炭素の混合割合が微少となり、測温ポイントを細かく設定するのは難しいと思われる。左側の液相線上の組成でも可能と考えられるが、設定できる温度幅が狭い。

Ru-C系は、図 3.5 に示す状態図²⁴⁾により、1953°Cから 2000°C程度までカーボンの組成比 16.4~17.8 原子%の組成で可能である。共晶点を中心に液相線がほぼ左右対称になっていることから、どちらの液相線に基づく組成でも良い。表 3.11 に 1953°Cから 2000°Cまでのカーボン組成比に対応する融点を示す。

今回の検討により、表 3.12 に示す炭素合金を使用することによって、1500°Cから 2000°Cまでの温度モニターによる温度測定は可能と考えられる。文献によって共晶点の温度に違いがあり、参考にした状態図も液相・固相線が点線で記載されている部分もあることから、合金の製作を含めた開発を基に測温点は、実際に試験を実施して決める必要がある。Rh の液相線は勾配が緩やかで温度範囲を広くとれる利点があるが、コスト的に高いため、Rh-C系に変わつて単価が 1/5 程度の Pt-C系を使用し、温度測定点を設定することが可能である。

ホルダー材料については、炉心構造物の黒鉛との共存性を考慮する必要があり、また、2000°C以上の融点を有する物質で無くてはならない。金属系では Ta, W 等が挙げられるが、Ta, W は 2000°C付近で炭素と金属間化合物作り候補として挙げるが採用できないと考えられる。金属系以外ではセラミック系及び黒鉛が考えられ、耐熱性の高いセラミックは、PBN, ZrO₂, ThO₂, TiB₂ があり、その中で黒鉛と共存性が良い物は PBN, ThO₂, TiB₂¹²⁾ である。ThO₂ は核原料物質で炉内使用の検討対象としない。また、PBN, TiB₂ に含まれる硼素は、中性子吸収断面積が大きいため両者を炉内での使用に適さない。前述のように温度モニターに炭素合金を使用することを前提にすると、ホルダー材質は黒鉛が最適と本検

討で結論づけた。

3.3 溫度モニターの構造

温度モニターの構造について検討した。

燃料温度測定を想定し、燃料コンパクトの中央にも入れられるようにするため、直径は 10mm より小さく考えている。黒鉛ブロックに装荷孔を設けて入れることも考えられるがこの場合はもう少し、直径を大きくすることができる。

(1) 黒鉛ホルダー型温度モニター (図 3.6)

黒鉛ホルダー型の場合はホルダー内の密封は難しいため、温度モニターの合金に酸化に強い純金属を選択の上、溶融金属の飛散防止のため、上部にネジ式の蓋を設ける。蓋には必要に応じ通気口を設け、HTTRでの炉内の雰囲気(ヘリウム)と同一とする。また、黒鉛ホルダーからの溶融金属の拡散及び合金への炭素の拡散を避けるために黒鉛ホルダーの内表面の対策が必要であると考えられる。

(2) 黒鉛ホルダー型温度モニター (複数タイプ) (図 3.7)

複数の温度モニターを装荷できるようにすることで、測定をより確実にすることができる、ブロックの軸方向に深さの異なる穴を開け装荷した場合には、一度に軸方向の測定位置を変え測定が可能であることと、X線で観察する際に1方向からX線を照射し、一度に合金線を3つ共観察できるメリットも考えられる。

(3) 黒鉛ホルダーの内表面対策

(1)及び(2)の黒鉛ホルダーの内表面対策として、コーティングが考えられる。

コーティングには、黒鉛を不浸透性にして溶融した金属の黒鉛ホルダーへの拡散防止及び温度モニターへの炭素の拡散を防止する目的がある。特に共晶点以外の組成時には対策は必要と考えられる。高温での共存性を考えるとコーティング材として炭化物系を選択した方がよいと考えられる。(硼化物の候補も考えられるが中性子吸収断面積が大きいので検討対象としない。)

炭化物系コーティング方法として、パイロコート(熱分解炭素皮膜)、ガラス状炭素コート、SiC、TaC及びTiCコートの各種コーティング材の特徴を表3.13に挙げた。

SiCは残留酸素によって低酸素状態での遊離Siが遊離し合金と反応する可能性が考えられ、TaC及びTiCは低温での遊離は無いのでこの点で有利と考えられる。

パイロコート等のカーボンコーティングは、溶融金属の染み出し防止としてホルダー外表面に使用し、内面は炭素合金と接するのでTaC等のセラミック系コーティングの方が良いと考えられる。但し、共晶点測定の場合は、逆に黒鉛との反応を利用するので、内外面をカーボンコーティングとするか、または内面コート無しで外面のみコートのみとする必要があると考えられる。

4.まとめ

H T T R の炉内環境条件の下、燃料温度 2000°Cの測定を目的とした温度測定方法について、オンライン計測では既存温度測定法を調査し、W／R e を素線とする T a またはM o シース、B e O 絶縁材を組み合わせた熱電対による温度測定が材料選択的に最も可能性が高いことを明らかにした。また、オフライン測定法においても白金属—炭素高融点合金素線に黒鉛ホルダーを使用し、その共晶点（融点）にて融解することで到達した温度が検知できる温度モニターより温度測定が可能であることを示した。

謝辞

本作業、本報告作成に当たり、ご指導、御助言戴いた高温工学試験研究炉部 伊与久達夫研究主席、藤本望計画課課長にまた、助川電気工業株式会社の関係する方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) S.Saito, T.Tanaka, Y.Sudo, O.Baba, et.al."Design of High Temperature Engineering Test Reactor(HTTR)", JAERI 1332(1994)
- 2) 林君夫、塙沢周策、沢和弘、佐藤貞夫、丸山創、小林紀昭、福田幸朔「高温工学試験研究炉用燃料の設計方針、製作性及び総合的健全評価」JAERI-M 89-161(1989)
- 3) 沢和弘、藤井貞夫、塙沢周策、平野光将「高温工学試験研究炉における被覆粒子の破損及びF P放出率の評価法」JAERI-M 88-258(1988)
- 4) 丸山創、藤本望、山下清信、村田勲、他「高温工学試験研究炉炉心熱流力設計」JARI-M 88-255(1988)
- 5) 「独立行政法人 日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター（北地区）原子炉設置許可申請書 別冊3 H T T R」
- 6) 新編温度計測 温度計測部会編 (社) 計測自動制御学会 平成4年10月25日初版発行
- 7) TEMPERATURE, INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA, Vol.4 Part3, 1972
- 8) 日本機械学会論文集 佐藤千之助他 (社) 日本機械学会 33巻247号 昭和42年
- 9) エル・イエ・クルジジャノフスキイ他、酸化物の熱物理的性質 (有) 日ソ通信社 昭和50年3月20日発行
- 10) 吉木文平、耐火物工学 技報堂出版(株) 昭和50年12月1日初版6刷発行
- 11) 三島良績、特殊金属材料、(株) コロナ社 昭和49年1月30日初版6刷発行
- 12) L・Aレイ、セラミックスの耐食性ハンドブック 共立出版(株)
昭和60年12月15日発行
- 13) イビデン黒鉛カタログ
- 14) 真空ハンドブック 改訂版III (株) アルバック 平元年8月31日3版発行
- 15) アイソトープ手帳 改訂9版 日本アイソトープ協会 丸善(株)
平成10年10月30日発行
- 16) 新版アイソトープ便覧 日本放射線同位元素協会編 丸善(株)
昭和45年10月25日発行
- 17) センサの原理と使い方 (3) (社) 計量管理協会 (株) コロナ社
昭和59年10月15日初版発行
- 18) 二木久夫、村上孝一、温度センサー 日刊工業新聞社、
昭和55年3月31日初版発行
- 19) 植田祥平、飛田勉、沢和弘、富本浩、小澤太教、猪井宏幸、梅田政幸
「高温ガス炉燃料温度計測用温度モニターの照射特性試験」 JAEA-Research
2008-096

- 20) 山田善郎、金属一炭素共晶を用いた高温度標準の動向,計測と制御, (社) 計測自動制御学会 42/11,2003/11
- 21) N.Sasajima, Y.Yamada, F.Sakura, Investigation of Fixed Points Exceeding 2500°C Using Metal Carbide-Carbon Eutectics, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol.7 (2003)
- 22) Emma R Wooliams, Graham Machin, David H Lowe, Rainer Winkler, Metal(carbide)-carbon eutectics for thermometry and radiometry a review of the first seven years, Metrologia 43 (2006) R11-R25
- 23) アグネ 新金属データブック (株) アグネ 昭和 52 年 3 月 20 日初版発行
- 24) Okamoto, Desk Handbook Phase Diagrams for Binary Alloys, ASM International 平成 12 年 9 月初版発行

表 2.1 オンライン温度計測方法⁶⁾

温度計の種類	温度計としての特徴	誤差要因
抵抗温度計 (測温抵抗体)	1. 数 $c\ m^3$ 程度の温度の平均値を測定するのに適する。 2. 約 -273 ~ 500 °C で精度のよい温度測定に適する。 3. 強い振動を有する対象物には適さない。	温度の変化速度 検出器の経年変化 熱履歴による変化 自己加熱 測定導線からの熱の流出入
サーミスター温度計	1. 数 $c\ m^3$ 程度の温度の平均値を測定するのに適する。 2. 導線抵抗に比べて検出器の抵抗が大きい。 3. 一つの検出器での使用温度範囲が狭い。 4. 衝撃に弱い。	検出器の経年変化 自己加熱 測定導線からの熱の流出入
熱電温度計 (熱電対)	1. 接点の大きさ程度の温度を測定する事が出来る。 2. 応答が良い。 3. 振動・衝撃に強い。 4. 温度差が測定できる。 5. 高温での測定ができる。 6. 基準接点が必要である。	基準接点の安定性 補償導線の影響 寄生起電力 検出器の経年変化 熱履歴による変化 熱電対線などからによる熱の流出入
放射温度計	1. 高温域の温度測定に適する。 2. 遠隔測定が可能である。 3. 移動又は回転している物体の表面温度を測定できる。 4. 被測定物の温度を乱すことが少ない。 5. 遅れの少ない測定が可能である。	放射率の補正が必要。 2色温度計でも各波長との放射率比補正が必要。 最小スポット径がある。
熱雑音温度計	1. 広い範囲の温度測定に適する。 2. 温度校正が不要。	信号電圧が小さく信号処理が難しい。
超音波温度計	1. 物質中を音波が伝われば良いので、高温な場所や放射線の影響があるなど悪環境でも測定可能。 2. 応答性がよい。	分解能が悪い。 水晶の耐熱温度が低い。

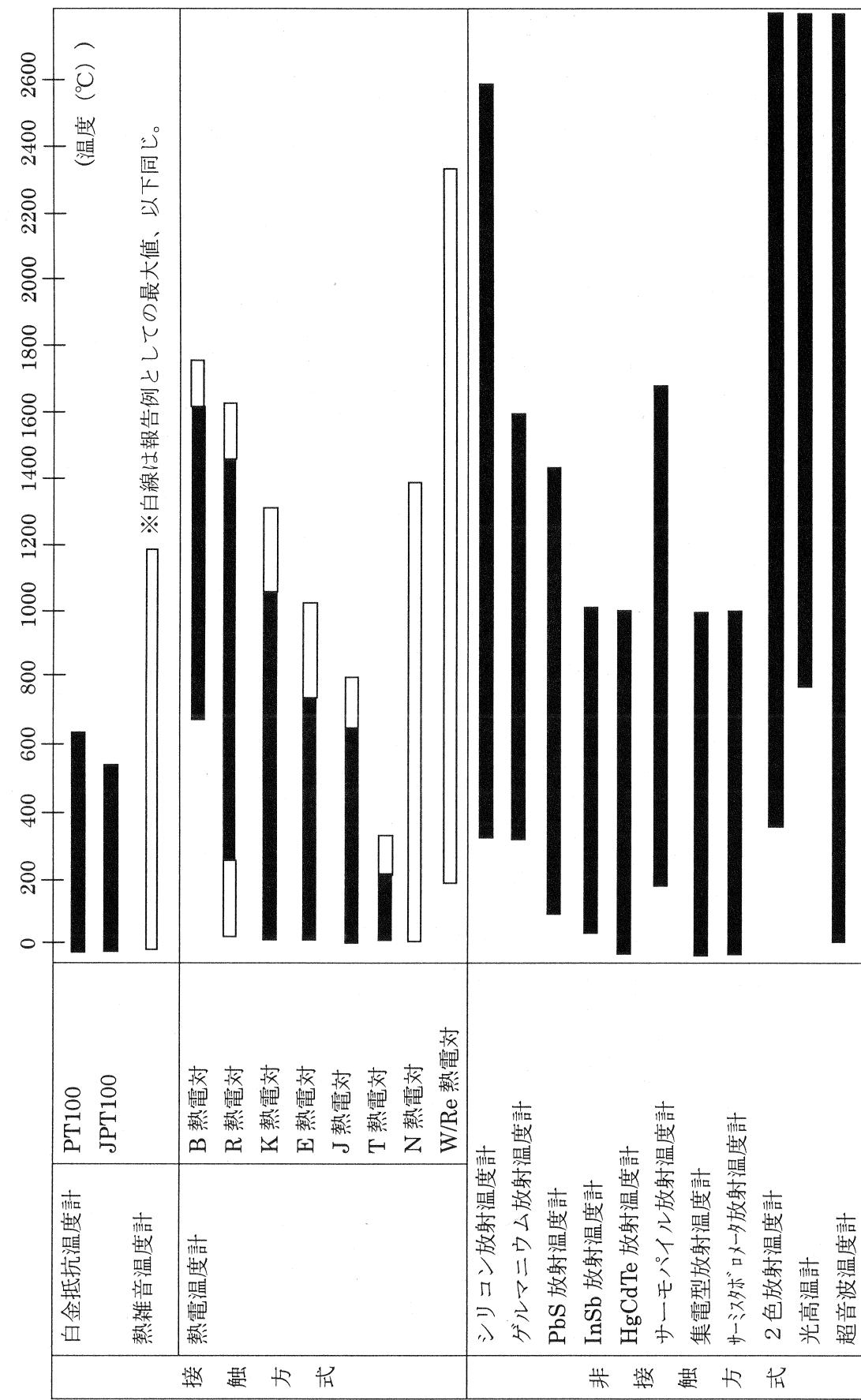
表 2.2 測定温度範囲⁶⁾

表 2.3 W/R e 热電対の種類⁶⁾

両脚の構成材料		最高使用温度 (°C)	特長・その他
+脚	-脚		
W	W 2 6 % R e	2400°C	Re が高価であり、これを減じた種類 機械的強度改良
W	W 2 0 % R e	2400°C	
W	W 1 0 % R e	2400°C	
W 5 % R e	W 2 6 % R e	2400°C	
W 7 % R e	W 2 6 % R e	2400°C	
W 3 % R e	W 2 5 % R e	2400°C	

表 2.4 I r / R h 热電対の種類⁶⁾

両脚の構成材料		最高使用温度 (°C)	特長・その他
+脚	-脚		
I r	R h 4 0 % I r	2000°C	真空・不活性、還元性雰囲気中での使用に適している。イリジウム蒸気による汚染がある。脆い。起電力小さい。
I r	R h 5 0 % I r	2000°C	
I r	I r 4 0 % R h	2000°C	

表 2.5 非金属系热電対の種類⁷⁾

両脚の構成材料		最高使用温度 (°C)	特長・その他
+脚	-脚		
B ₄ C	C	2500	起電力 340 μ V/°C程度
NbC	ZrC	2600	起電力 13 μ V/°C程度
C	TiC	2500	起電力 65 μ V/°C程度
C-1.0B	C	3000	起電力 35 μ V/°C程度
C	ZrB ₂	2200	起電力 65 μ V/°C程度
C	NbC	3000	起電力 25 μ V/°C程度

表 2.6 無機絶縁材の物性等⁹⁾¹⁰⁾

絶縁材	融点 (°C)	熱膨張係数	密度 (g/cm ³)	入手性	価格
BeO	2550	9.5 × 10 ⁻⁶	3.03	△	×
MgO	2800	14 × 10 ⁻⁶	3.58	◎	◎
HfO ₂	2777	6.8 × 10 ⁻⁶	9.68	△	△
ThO ₂	3300	9.6 × 10 ⁻⁶	9.69	—	—

表 2.7 高融点シース材の物性¹¹⁾

シース材	融点	熱膨張係数	密度 g/cm ³	引張強さ(焼きなまし) Kg/mm ²	伸び(焼きなまし) (%)
Ta	2996°C	$6.5 \times 10^{-6}/\text{°C}$	16.6	35	40
Nb	2415°C	$7.1 \times 10^{-6}/\text{°C}$	8.6	35	20
Mo	2625°C	$4.9 \times 10^{-6}/\text{°C}$	10.2	52	55
W	3410°C	$4.4 \times 10^{-6}/\text{°C}$	19.3	49	0
Re(熱電対)	3180°C	$4.67 \times 10^{-6}/\text{°C}$	21	117.6(板)	28

表 2.8 高融点シース材と絶縁材の共存性¹²⁾

シース材	無機絶縁材			
	BeO	MgO	HfO ₂	ThO ₂
Ta	2000°Cまで安定	1540°Cまで安定	—	1900°Cまで安定
Nb	1800°Cまで安定	1900°Cまで安定	—	1800°Cまで安定
Mo	1900°Cまで安定	1600°Cまで安定	—	1900°Cまで安定
W	2000°Cまで安定	2000°Cまで安定	—	2200°Cまで安定
Re(熱電対)	>2000°C安定	—	2350°Cまで安定	>2000°C安定

— 共存性データが見つからず。

表 2.9 高融点シース材及び絶縁材と黒鉛の共存性¹²⁾¹³⁾

シース材、 絶縁材	黒鉛	反応生成物
Ta	2200°Cまで安定、1600°Cまで安定(水素中)	TaC
Nb	870°Cまで安定	NbC, Nb ₂ C(ヘリウム中)
Mo	1200°Cまで安定	MoC
W	1400°Cまで安定	W ₂ C, WC (水素中)
Re(熱電対)	—	—
BeO	2300°Cまで安定	—
MgO	1350°Cまで安定	—
HfO ₂	2000°Cまで安定	HfC
ThO ₂	2100°Cまで安定	ThC ThC ₂

— 共存性データが見つからず。

表 2.10 シース材の蒸気圧表¹⁴⁾

物質	蒸気圧 (Pa)						
	1.33×10^{-4}	1.33×10^{-3}	1.33×10^{-2}	1.33×10^{-1}	1.33	13.3	133
Ta	2234°C	2402°C	2589°C	2804°C	3056°C	3352°C	3705°C
Nb	1977°C	2127°C	2287°C	2477°C	2707°C	2977°C	3297°C
Mo	1817°C	1955°C	2113°C	2299°C	2524°C	2773°C	—
W	2394°C	2564°C	2756°C	2974°C	3229°C	3455°C	3868°C
Re	2207°C	2376°C	2571°C	2796°C	3060°C	3375°C	3763°C

— 蒸気圧データが見つからず。

表 2.11 絶縁材の蒸気圧表¹⁴⁾

物質	蒸気圧 (Pa)					
	1.33×10^{-3}	1.33×10^{-2}	1.33×10^{-1}	1.33	13.3	133
BeO	1797°C	1934°C	2092°C	2273°C	2484°C	2734°C
MgO	1234°C	1322°C	1421°C	1533°C	1660°C	1807°C
HfO ₂	—	—	—	—	—	—
ThO ₂	1822°C	1971°C	2143°C	2343°C	2579°C	2862°C

— 蒸気圧データが見つからず。

表 2.12 热電対構成品材料の放射性同位元素としてのデータ¹⁵⁾

核種	半減期	核種	半減期
¹⁸⁰ Ta	8.152h	¹⁸³ Re	70.0d
¹⁸² Ta	114.4d	¹⁸⁶ Re	90.64h
⁹⁰ Nb	14.60h	¹⁸⁸ Re	17.005h
^{93m} Nb	16.13y	⁷ Be	53.29d
⁹⁴ Nb	2.03×10^4 y	²⁷ Mg	9.462m
^{95m} Nb	86.6h	²⁸ Mg	20.91h 娘 ²⁸ Al
⁹⁵ Nb	34.98d	¹⁷⁵ Hf	70d
^{97m} Nb	52.7s	^{180m} Hf	5.5h 娘 ¹⁸⁰ Ta
⁹⁷ Nb	72.1m	¹⁸¹ Hf	42.39d
⁹⁹ Mo	65.94h 娘 ^{99m} Tc	²²⁸ Th	1.912y 娘 ²²⁴ Ra
¹⁸¹ W	121.2d	²³⁰ Th	7.538×10^4 y
¹⁸⁵ W	75.1d	²³¹ Th	25.52h 娘 ²³¹ Pa
¹⁸⁷ W	23.72h	²³² Th	1.40×10^{10} y 娘 ²²⁸ Ra
¹⁸⁸ W	69.4d 娘 ¹⁸⁸ Re	²³³ Th	22.3m 娘 ²³³ Pa

表 2.13 热電対構成品材料の放射性同位元素の吸収断面積¹⁵⁾

元素	吸収断面積 (barn)	中性子捕獲断面積 σ_c (barn)
⁷³ Ta	20.7	20.56
⁷⁴ W	18.3	18.4 ± 0.3
⁷² Hf	105	104.1 ± 0.5
⁷⁵ Re	—	89.7 ± 1.4
⁹⁰ Th	7.4	7.37 ± 0.06
⁴ Be	7.6(mbarn)	7.6(mbarn)
¹² Mg	63(mbarn)	63 ± 3 (mbarn)
⁴¹ Nb	1.15	1.15 ± 0.05
⁴² Mo	2.58	2.55 ± 0.05

— : 文献 15)にデータ記載なし。

表 2.14 市販品放射温度計の種類⁶⁾

形 式		検 出 素 子
全放射温度計	熱電形	サーモパイル(TE), ポロメータ(TC), 焦電素子
部分放射温度計	光電形	光電管, 光電子倍増管(PE) PbS,Ge,InSb(PC) Si,InAs,InSb, Hg,Cd,Te(PV)
単色放射温度計	光温度計形	肉眼, 光電子倍増管
2色温度計	可視2色 赤外2色	Si,Ge,光電子倍増管 PbS
走査放射温度計 (1次元, 2次元)	機械式走査 電子式走査	ポロメータ,InSb,Ge(Au),Hg,Cd,Te 赤外ビジョン, CCD
半球鏡付表面温度計		サーモパイル, Si

表 3.1 金属—炭素共晶合金と融点²⁰⁾²¹⁾²²⁾

合金	融点 (共晶点)
P d - C	1492°C
R h - C	1657°C
P t - C	1738°C
R u - C	1953°C

表 3.2 合金線材の物性²³⁾

	P d	R h	P t	R u
融点 (°C)	1554	1960	1769	2310
沸点 (°C)	3140	3727	3827	3900
密度 (g/cm ³ @20°C)	12.02	12.41	21.45	12.45
線膨張係数(0-100°C)	11.1×10 ⁻⁶	8.3×10 ⁻⁶	9.1×10 ⁻⁶	9.6×10 ⁻⁶
引張強さ(N/mm ²)	172	688	125	496

表 3.3 溫度モニターに選択の金属の蒸気圧表¹⁴⁾

物質	蒸気圧 (Pa)						
	1.33×10 ⁻⁴	1.33×10 ⁻³	1.33×10 ⁻²	1.33×10 ⁻¹	1.33	13.3	133
P d (°C)	1063	1157	1266	1394	1574	1738	1973
R h (°C)	1462	1574	1703	1851	2030	2256	2521
P t (°C)	1471	1585	1715	1867	2043	2267	2531
R u (°C)	1778	1907	2055	2223	2419	2656	2940

表 3.4 合金線材（元素）に関する放射性同位元素のデータ¹⁵⁾

核種	半減期	核種	半減期
¹⁰⁵ Rh	35.36 h	¹⁰⁶ Ru	373.6 d 娘 ¹⁰⁶ Rh
¹⁰⁶ Rh	29.8 s	⁹⁹ Rh	16.1d
¹⁰³ Pd	16.99d 娘 ^{103m} Rh	^{103m} Rh	56.11m
¹⁰⁹ Pd	13.70 h 娘 ^{109m} Ag	^{105m} Rh	40s 娘 ¹⁰⁵ Rh
¹⁰³ Ru	39.26 d 娘 ^{103m} Rh	¹⁹⁷ Pt	19.89h
¹⁰⁵ Ru	4.44 h 娘 ^{105m} Rh、 ¹⁰⁵ Rh	¹⁹⁹ Pt	30.8m 娘 ¹⁹⁹ Au

表 3.5 生成核種と生成量¹⁶⁾

生成核種	飽和係数	生成量	
		dps	μ Ci
¹⁰³ Ru	0.000725	2×10^5	5
¹⁰⁵ Ru	0.14	1×10^8	3×10^3
¹⁰³ Pd	0.00170	4×10^5	10
¹⁰⁹ Pd	0.0497	8×10^8	2×10^4
¹¹¹ Pd	0.850	1×10^8	3×10^3
¹⁸⁶ Re	0.000780	1.1×10^9	3×10^4
¹⁸⁸ Re	0.0406	5.7×10^9	1.5×10^5
^{193m} Pt	0.0066	1×10^7	4×10^2
¹⁹⁷ Pt	0.038	2.6×10^7	7×10^2
¹⁹⁹ Pt	0.753	7×10^8	2×10^4

表 3.6 热中性子による放射化分析の感度¹⁶⁾

目的元素	放射化される 核種	感度 (μ g)	同一核種を生ずる核反応		
			(n, α)	(n,p)	(n,2n)
Ru	¹⁰² Ru	0.09			¹⁰⁴ Ru
Ru	¹⁰⁴ Ru	0.03			
Rh	¹⁰⁸ Rh	0.0003			
Pd	¹⁰⁸ Pd	0.001		¹⁰⁹ Ag	
Pt	¹⁹² Pt	0.02			¹⁹⁴ Pt
Pt	¹⁹⁶ Pt	0.03		²⁰⁰ Hg	¹⁹⁸ Pt
Pt	¹⁹⁸ Pt	0.02		²⁰² Hg	

表 3.7 合金線材（元素）の中性子断面積¹⁵⁾

元素	吸収断面積 (barn)	中性子捕獲断面積 σ_c (barn)
⁴⁴ Ru	2.75	2.56±0.13
⁴⁵ Rh	147	145±2
⁴⁶ Pd	—	6.9±0.4
⁷⁸ Pt	—	10.3±0.3

—：文献 15)にデータ記載なし。

表 3.8 P d - C 合金の組成カーボン原子(%)と融点²⁴⁾

組成カーボン原子(%)	融点(°C)
19.5	1492 (共晶点)
20.0	1550
20.6	1600
21.2	1650
22.1	1700
23.0	1750
24.0	1800

表 3.9 R h - C 合金の組成カーボン原子 (%) と融点²⁴⁾

組成カーボン原子 (%)	融点 (°C)
15.0	1657(共晶点)
13.2	1720
11.9	1740
11.2	1760
9.8	1780
8.5	1800
7.3	1820
6.8	1840
6.0	1860
4.4	1880
3.5	1900

表 3.10 P t - C 合金の組成カーボン原子 (%) と融点²⁴⁾

組成カーボン原子 (%)	融点 (°C)
16.6	1738(共晶点)
18.3	1800
19.0	1850
19.8	1900
20.3	1920
20.8	1950
21.8	2000

表 3.11 R u - C 合金の組成カーボン原子 (%) と融点²⁴⁾

組成カーボン原子 (%)	融点 (°C)
18.3	1953(共晶点)
17.7	1960
17.2	1980
16.4	2000

表 3.12 1400°C～2000°Cを測定温度範囲とする温度モニター

合金種類	融点温度 (°C)	配合カーボン原子%	合金種類	配合カーボン 原子%
Pd-C	1492(共晶点)	19.5%	—	—
Pd-C	1550	20.0%	—	—
Pd-C	1600	20.6%	—	—
Rh-C	1657(共晶点)	15.0%	—	—
Rh-C	1720	13.2%	—	—
Pt-C	1738(共晶点)	16.6%	—	—
Rh-C	1760	11.2%	—	—
Rh-C	1780	9.8%	—	—
Rh-C	1800	8.5%	Pt-C	18.3%
Rh-C	1820	7.3%	—	—
Rh-C	1840	6.8%	Pt-C	19.0%(1850°C)
Rh-C	1860	6.0%	—	—
Rh-C	1880	4.4%	—	—
Rh-C	1900	3.5%	Pt-C	19.8%
Pt-C	1920	20.3%	—	—
Ru-C	1953(共晶点)	18.3%	Pt-C	20.8%
Ru-C	1960	17.7%	—	—
Ru-C	1980	17.2%	—	—
Ru-C	2000	16.4%	Pt-C	21.8%

表 3.13 各種コーティング材の特徴¹³⁾ 他カタログより

コーティング材	特 徴
パイロコート	<ul style="list-style-type: none"> ・極めて緻密であり高密度である。 ・超高純度である。 ・低温域での耐酸化性、耐薬品性に優れる。 ・被膜厚さは標準で $40\mu\text{m}$ 程度。 ・2000°Cまでの剥離が少ない。
ガラス状炭素コート	<ul style="list-style-type: none"> ・表面強度が上がる。 ・純度が高い。 ・黒鉛粉の発生を抑制できる。 ・被膜厚さは標準で $3\mu\text{m}$ 程度。
S i C コート	<ul style="list-style-type: none"> ・超高純度である。 ・急速局部加熱に強い。 ・物理的衝撃に優れる。 ・耐薬性に優れる。 ・微細加工形状にも均一にコーティングが可能である。 ・酸化雰囲気でも使用できる。 ・被膜厚さは標準で $120\mu\text{m}$ ($20\mu\text{m} \sim 500\mu\text{m}$程度まで可能。) ・耐熱温度 : 1500°C (酸素分圧が低い状態で SiO の蒸発がある。) ・蒸気圧 : 10^{-4}torr (2080°C)
T a C コート	<ul style="list-style-type: none"> ・純度が高い。 ・気体不浸透性である。 ・表面遊離粉塵の発生が無い。 ・耐食性が良い。 ・機械的強度が高い。 ・耐熱衝撃性に優れる。 ・被膜厚さは標準で $20\mu\text{m}$ 程度。 ・蒸気圧 : 10^{-6}torr (2930°C)
T i C コート	<ul style="list-style-type: none"> ・純度が高い。 ・気体不浸透性である。 ・表面有利粉塵の発生が無い。 ・耐食性が良い。 ・機械的強度が高い。 ・耐熱衝撃性に優れる。 ・蒸気圧 : 10^{-4}torr (2560°C)

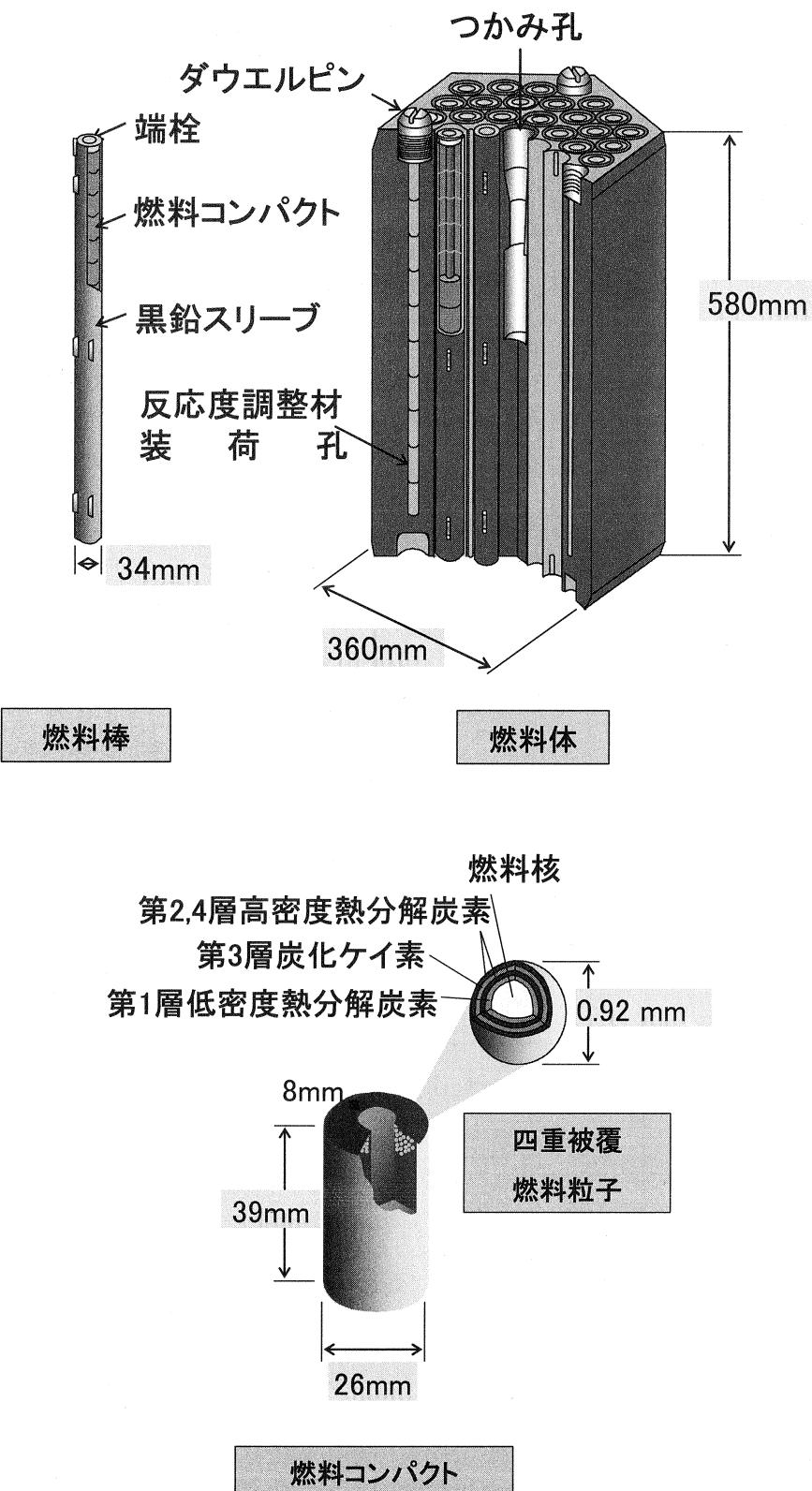


図 2.1 HTTR 燃料体の構成

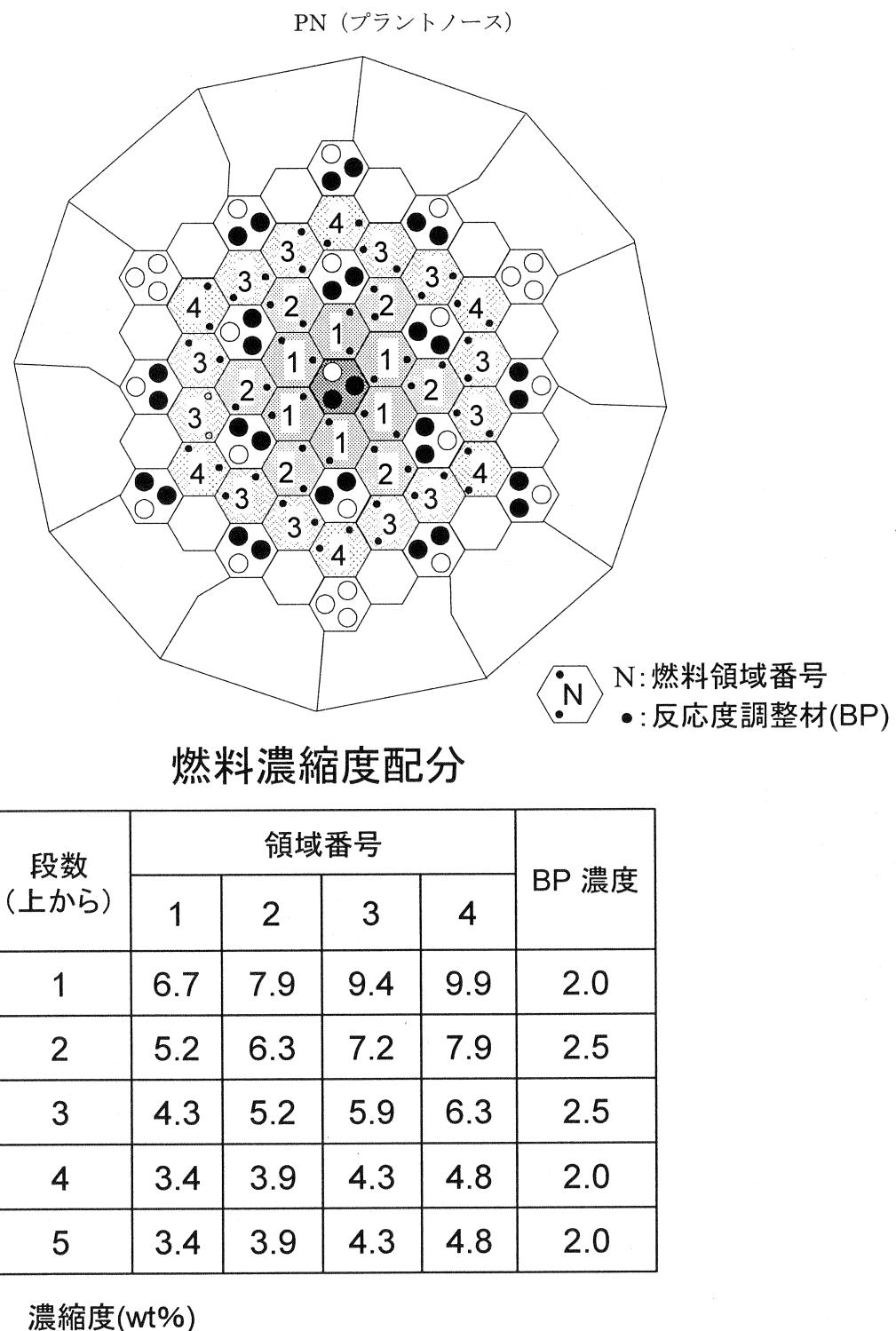


図 2.2 炉心配置図

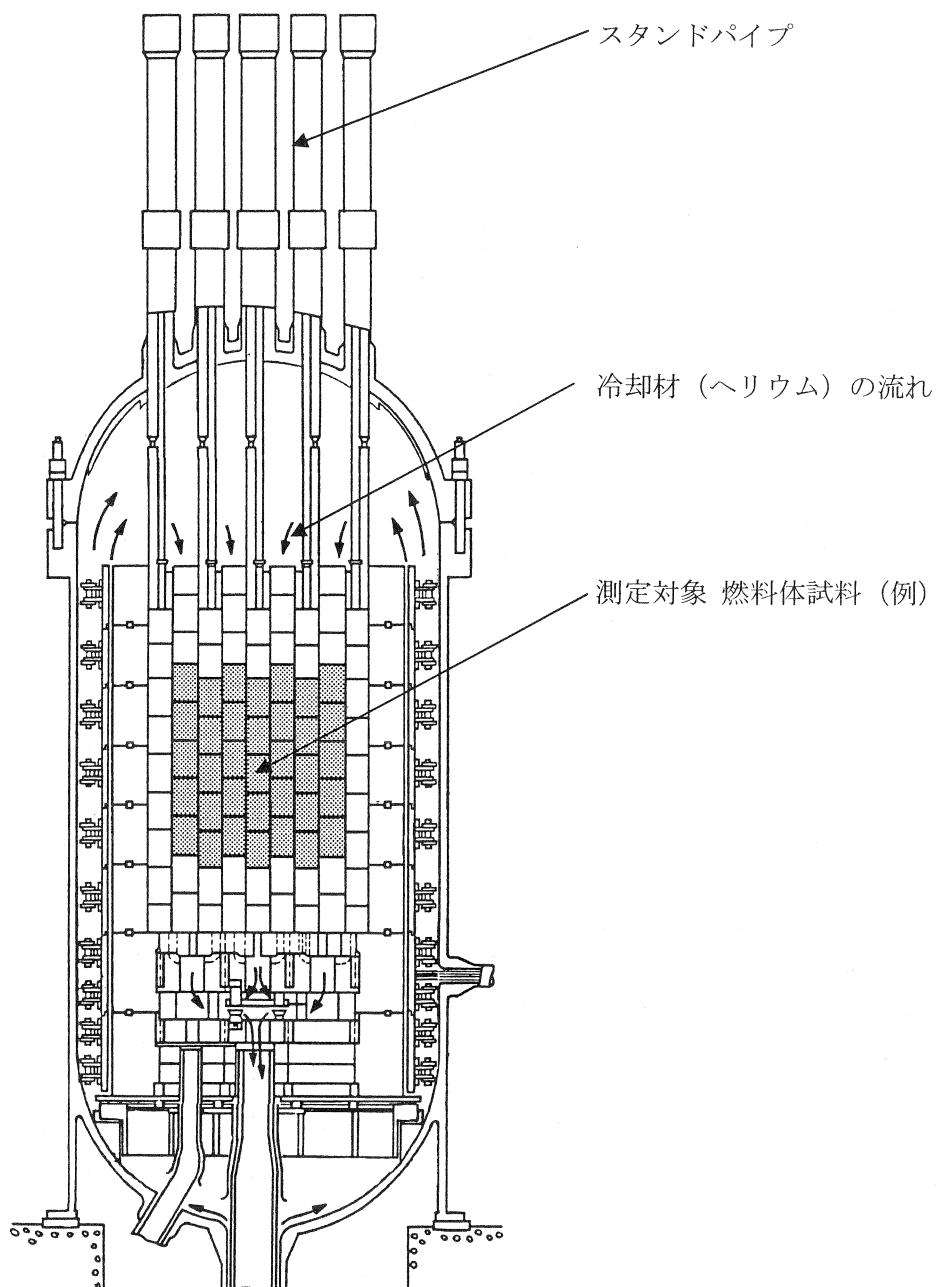


図 2.3 HTTR 構造図

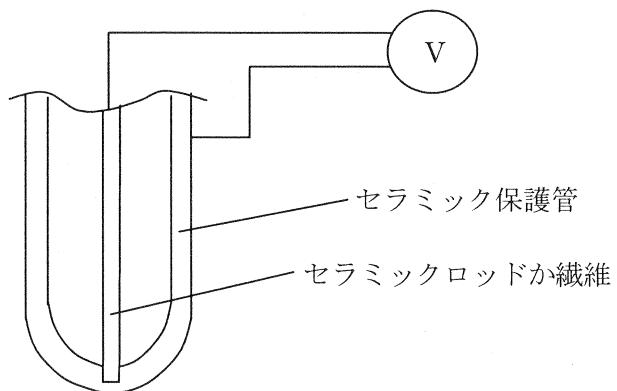


図 2.4 セラミック熱電対の構造

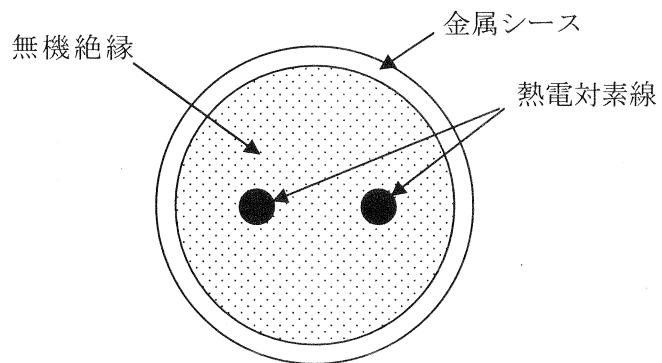


図 2.5 热電対の構成 (断面)

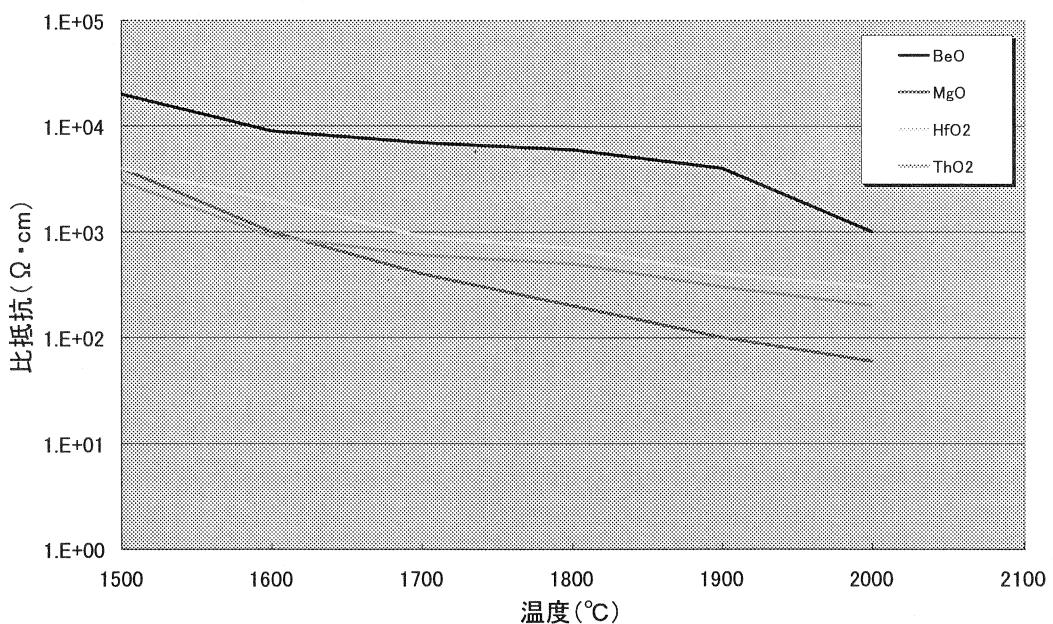


図 2.6 無機絶縁材温度絶縁特性

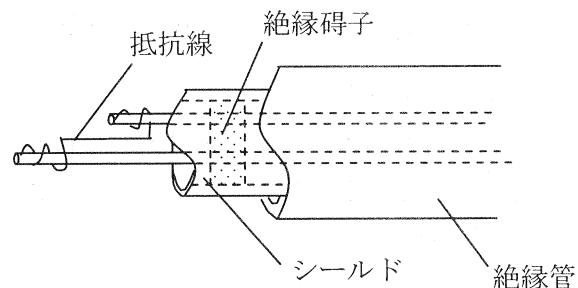


図 2.7 热雑音温度計の測温素子の構造

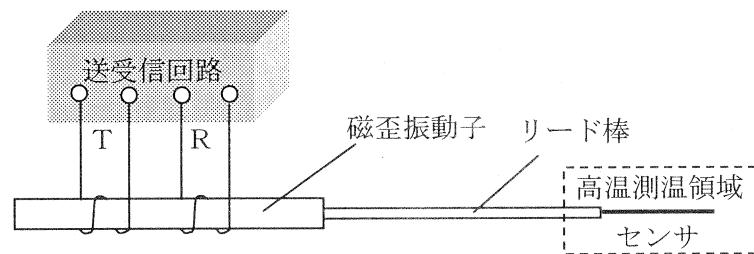


図 2.8 固体超音波温度計の原理構成

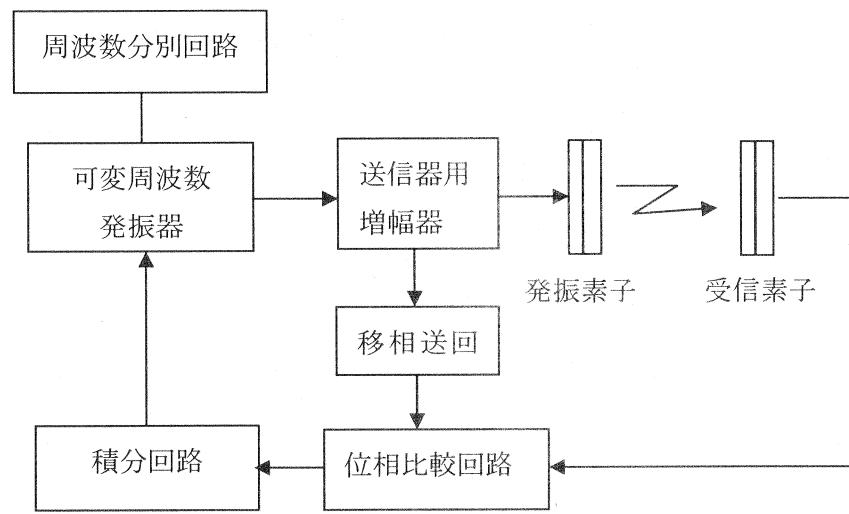


図 2.9 超音波による気体温度測定方法

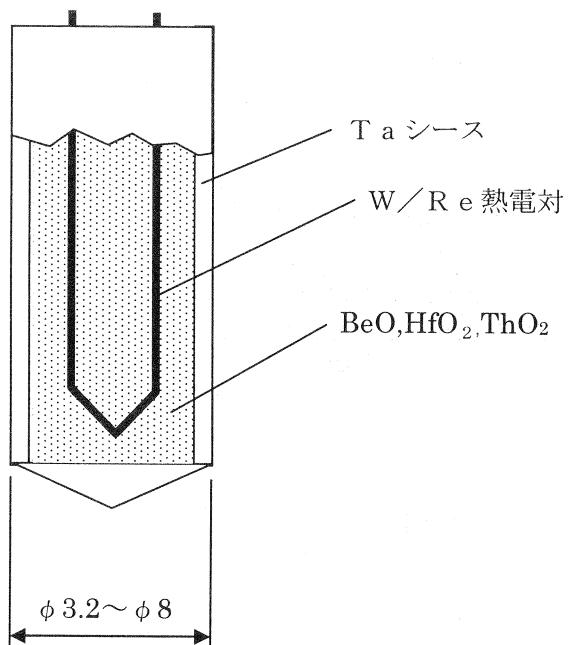


図 2.10 絶縁材充填型

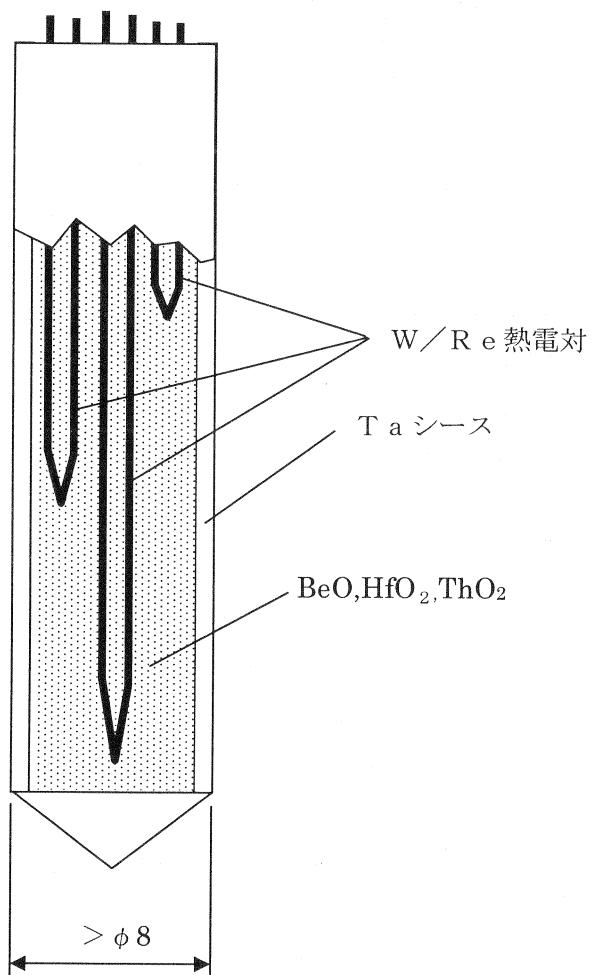


図 2.11 絶縁材充填型 (素線複数化)

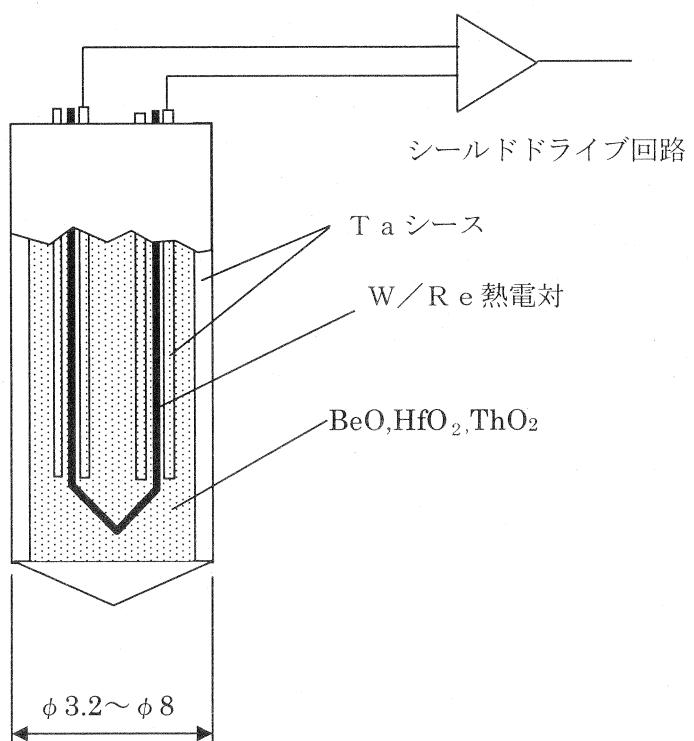


図 2.12 絶縁材充填型（素線シース）

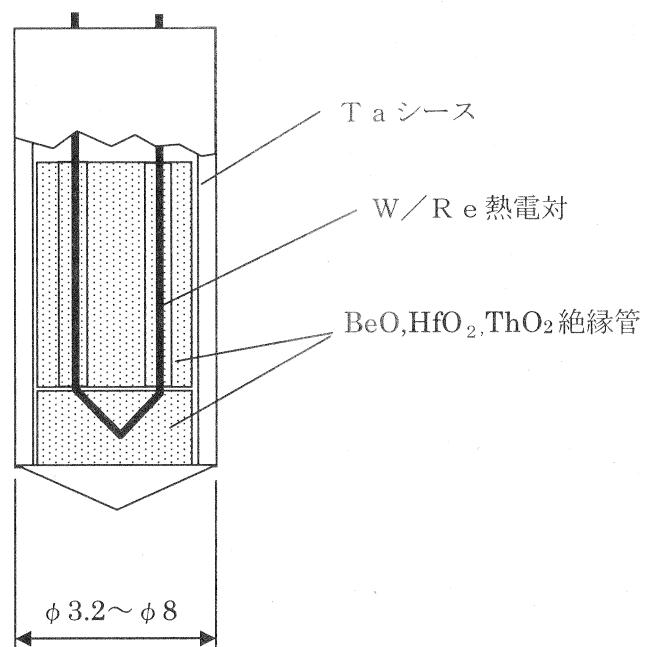


図 2.13 絶縁管型

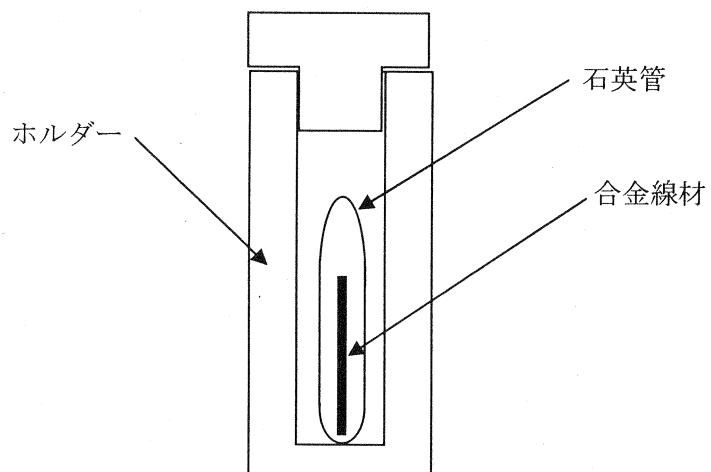


図 3.1 温度モニターの構造

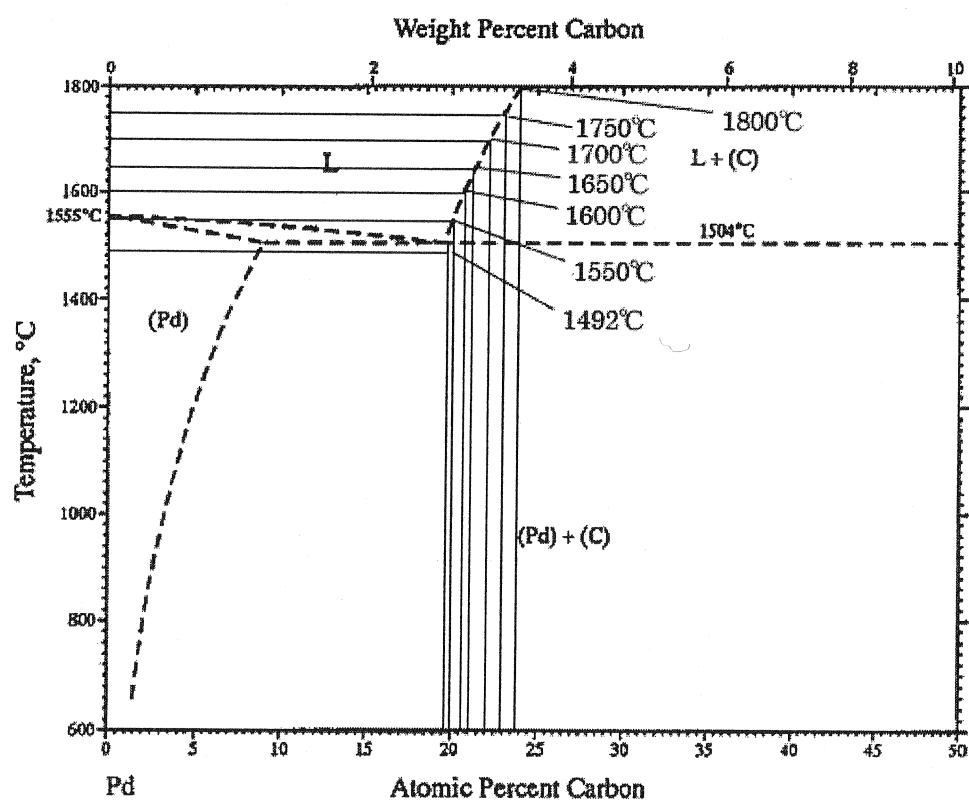


図 3.2 Pd-C 系合金の状態図²⁴⁾
(点線は現在、データ数が少數であることを示す。)

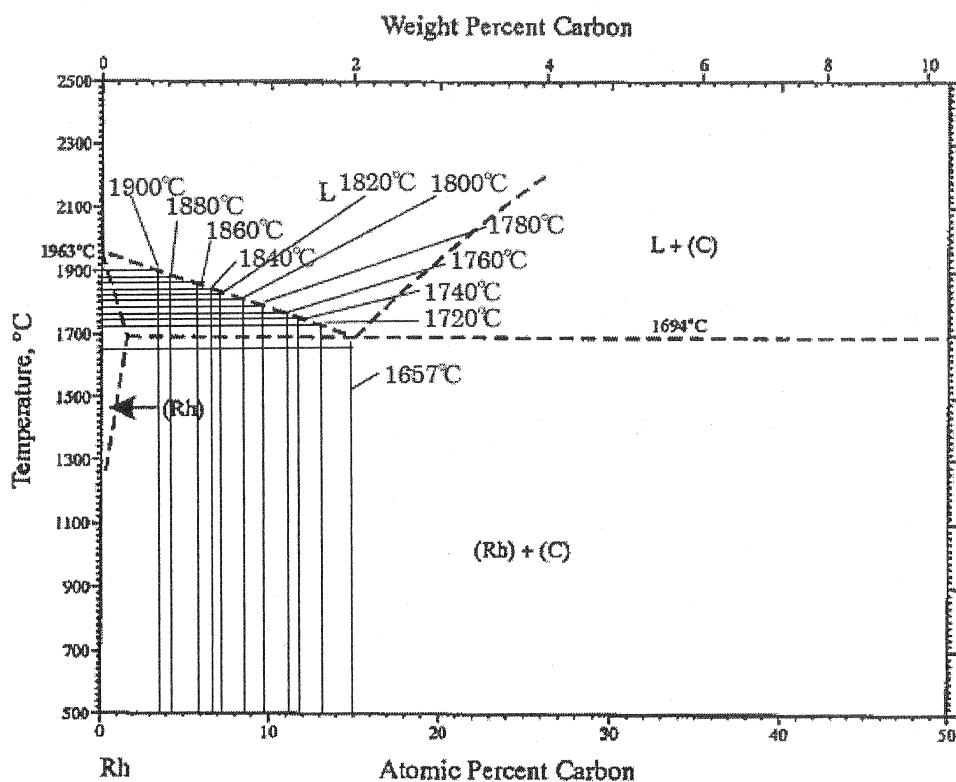


図 3.3 R h - C 系合金の状態図²⁴⁾
(点線は現在、データ数が少數であることを示す。)

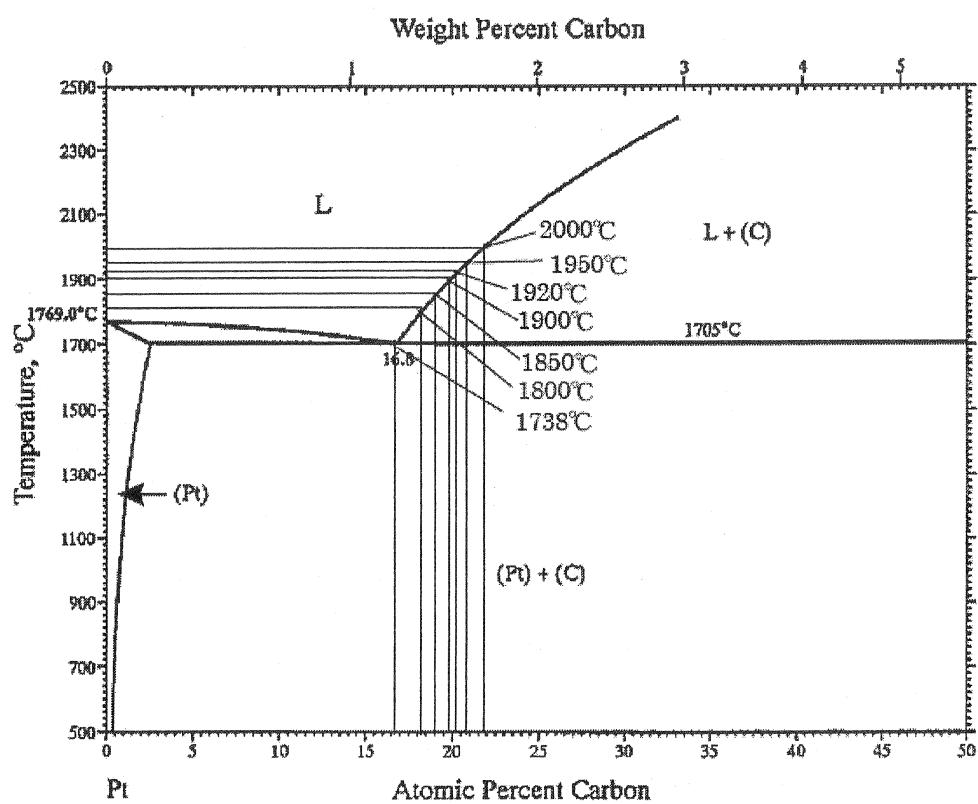


図 3.4 P t - C 系合金の状態図²⁴⁾

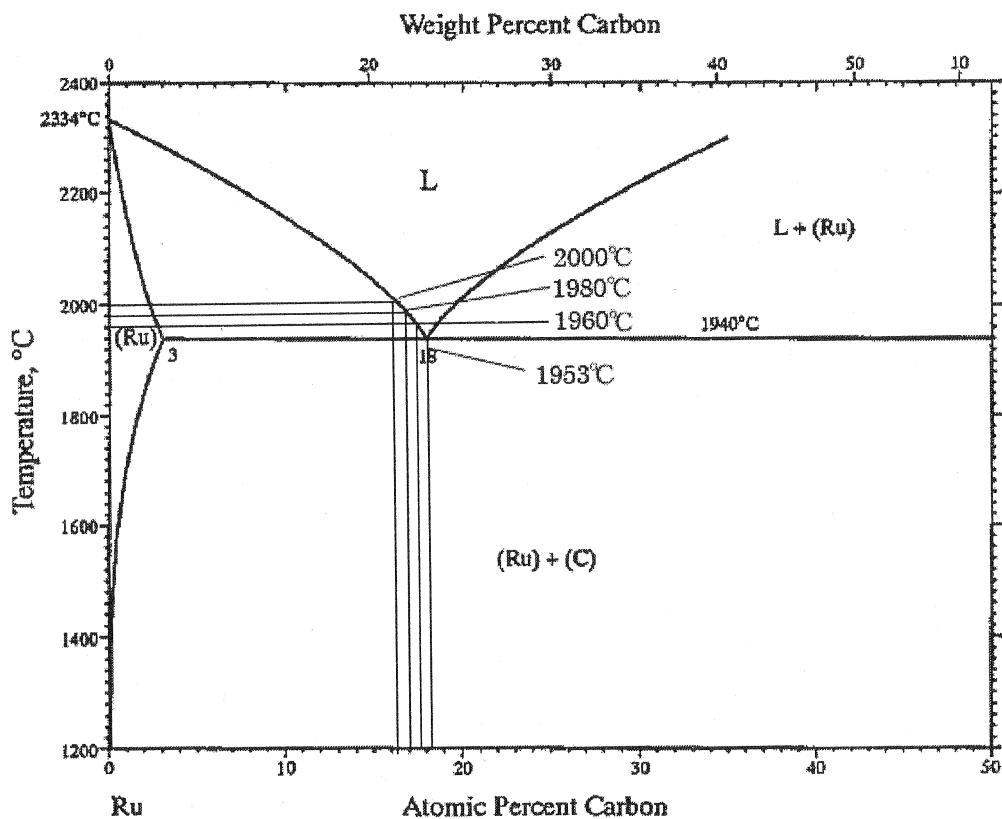


図 3.5 Ru-C 系合金の状態図²⁴⁾

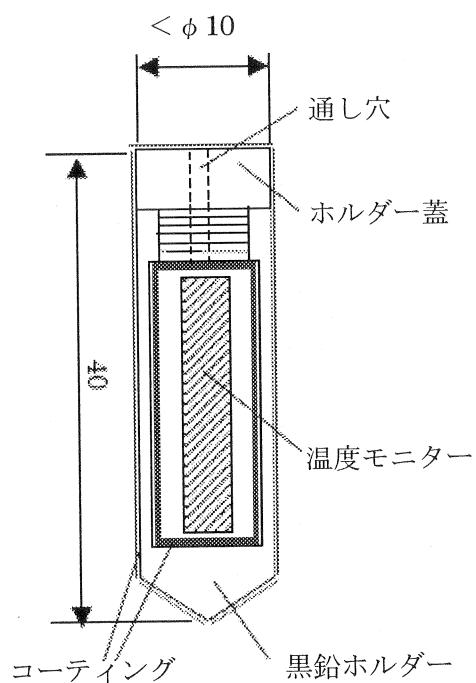


図 3.6 黒鉛ホルダー型温度モニター

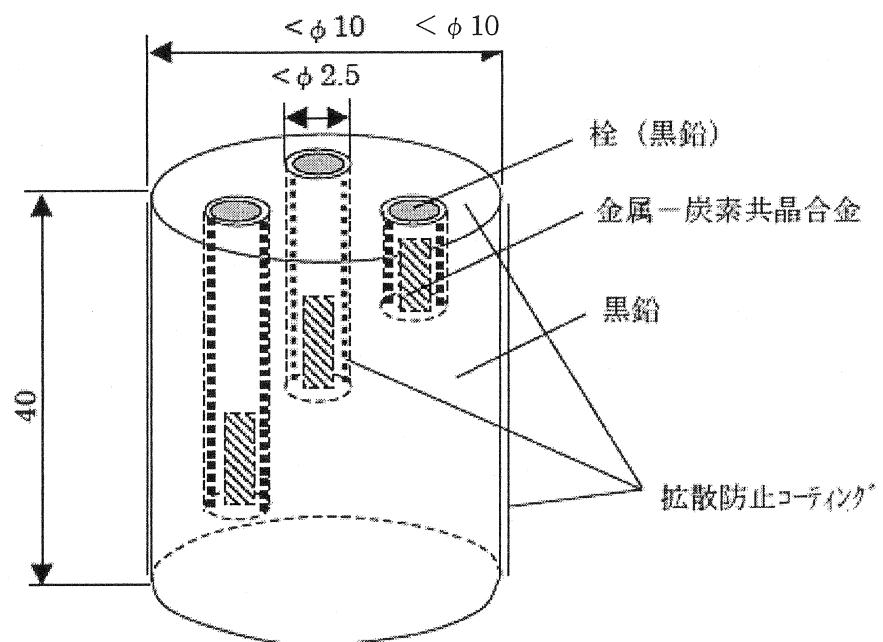


図 3.7 黒鉛ホルダー型温度モニター（複数タイプ）

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度, 加速度	メートル毎秒	m/s
波数	メートル毎秒	m/s
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比體積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度(substance concentration)ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	$1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	$1^{(b)}$
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \ kg \ s^{-2}$
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	$m^2 \ kg \ s^{-2}$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	$m^2 \ kg \ s^{-3}$
電荷, 電気量	クーロン	C	$s \ A$
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	$m^2 \ kg \ s^{-3} \ A^{-1}$
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \ kg \ s^{-3} \ A^{-2}$
コンダクタンス	シーメンス	S	A/V
磁束密度	ウエーバー	Wb	$m^2 \ kg \ s^{-2} \ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス度	セルシウス度 ^(e)	°C	K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー一分率	グレイ	Gy	J/kg
カーマ			$m^2 \ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg
酸素活性	カタール	kat	$m^2 \ s^{-2}$

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合せても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で“radioactivity”と記される。

(g) 単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはICIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1} \ kg \ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 \ kg \ s^{-2}$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$kg \ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m^{-1} \ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	$m^{-1} \ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度, 放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$kg \ s^{-3}$
熱容量, エントロピー	ジュール每ケルビン	J/K	$m^2 \ kg \ s^{-2} \ K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール每キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 \ s^{-2} \ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール每キログラム	J/kg	$m^2 \ s^{-2}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m K)	$kg \ s^{-3} \ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$m^1 \ kg \ s^2$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \ kg \ s^{-3} \ A^{-1}$
電荷密度	クーロン每立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \ sA$
表面電荷密度	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \ sA$
電束密度, 電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \ sA$
誘電率	アラード每メートル	F/m	$m^3 \ kg^{-1} \ s^4 \ A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \ kg \ s^{-2} \ A^2$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^2 \ kg \ s^{-2} \ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol K)	$m^2 \ kg \ s^{-2} \ K^{-1} \ mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{-2} \ s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^3 \ m^{-2} \ kg \ s^{-3}=m^2 \ kg \ s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² sr)	$m^2 \ m^{-2} \ kg \ s^{-3}=kg \ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール每立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} \ s^{-1} \ mol$

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \ rad$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \ rad$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \ rad$
ヘクタール	ha	$1ha=1m^2=10^4m^2$
リットル	L	$1L=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3kg$

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602 \ 176 \ 53(14) \times 10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660 \ 538 \ 86(28) \times 10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	$1u=1 Da$
天文単位	ua	$1ua=1.495 \ 978 \ 706 \ 91(6) \times 10^{11}m$

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	$1mmHg=133.322Pa$
オングストローム	Å	$1 \text{ \AA}=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	$1 M=1852m$
ノット	b	$1 b=100fm^2=(10^{-12}cm)^2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	$1 kn=(1852/3600)m/s$
ペル	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7}J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5}N$
ポアソン	P	$1 P=1 \text{ dyn } s \text{ cm}^{-2}=0.1 Pa \ s$
ストークス	St	$1 St=1cm^2 \ s^{-1}=10^4m^2 \ s^{-1}$
スチルズ	sb	$1 sb=1cd \ cm^{-2}=10^4cd \ m^{-2}$
フォント	ph	$1 ph=1cd \ sr \ cm^{-2} \ 10^4lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1cm \ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マックスウェル	Mx	$1 Mx=1G \ cm^2=10^8Wb$
ガウス	G	$1 G=1Mx \ cm^2=10^4T$
エルステッド	Oe	$1 Oe \triangleq (10^3/4\pi)A \ m^{-1}$

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 \triangleq 」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^4C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1cGy=10^2Gy$
レム	rem	$1 rem=1cSv=10^2Sv$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9}T$
フェルミ	fm	$1 \text{フェルミ}=1 fm=10^{-15}m$
メートル系カラット		$1 \text{メートル系カラット}=200 mg=2 \times 10^{-4}kg$
トル	Torr	$1 Torr = (101 325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm = 101 325 Pa$
カロリ	cal	$1 cal=4.1868J \ (15^\circ C \text{カロリー}), 4.1868J \ ((IT) \text{カロリー})$
ミクロン	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6}m$

