JAEA-Technology 2007-060



# 熱化学水素製造法 IS プロセス用高温継手の開発 ー皿バネ締結機構の機能評価試験及びガスケット 候補材のシール性評価試験結果ー

Development of High-Temperature Joints for Thermochemical Hydrogen Production by IS Process - Applicability Examination of the Coned-disk Springs Assembly and Seal Performance Test of Candidate Gaskets -

金川 昭宏\* 岩月 仁 石倉 修一 小貫 薫 日野 竜太郎

Akihiro KANAGAWA\*, Jin IWATSUKI, Shuichi ISHIKURA Kaoru ONUKI and Ryutaro HINO

> 原子力基礎工学研究部門 IS プロセス技術開発グループ

IS Process Technology Group Nuclear Science and Engineering Directorate  $\mathbf{O}$ 

ncy | 日本原子力研究開発機構

November 2007

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは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(<u>http://www.jaea.go.jp/index.shtml</u>) より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行っ ております。

**〒319-1195** 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 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 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

# 熱化学水素製造法 IS プロセス用高温継手の開発 ー皿バネ締結機構の機能評価試験及び ガスケット候補材のシール性評価試験結果-

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 核熱応用工学ユニット 金川 昭宏\*1、岩月 仁、石倉 修一\*1、小貫 薫、日野 竜太郎

(2007年7月25日受理)

熱化学法 IS プロセスは、地球温暖化ガスである二酸化炭素を排出することなく大量の水素を 効率的に製造することが可能であり、高温ガス炉からの核熱を熱源として使用する。IS プロセス は強酸である硫酸やヨウ化水素酸を高温高圧下で使用する。このため、耐熱性に加えて耐腐食性 の材料で大型化学反応器の開発が必須である。とくに、IS プロセスの主要機器である SO<sub>3</sub>分解器 は、高温高圧のヘリウム(He)ガス用の圧力容器と He ガス加熱による SO<sub>3</sub>分解のための内部構造 物から構成され、内部構造物の接続部は最高 700℃にまで達する。そこで、高温条件までシール 性能が確保できるように SiC ボルトと皿バネを用いた高温継手機構を考案した。本報では、考案 した高温継手の有効性確認試験結果と候補となるガスケットのシール性能試験結果について報告 する。

大洗研究開発センター(駐在):〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 \*1 三菱重工業(株)(2007年3月まで原子力基礎工学研究部門核熱応用工学ユニットに在籍) ※1 技術開発協力員(新型炉技術開発(株))

### JAEA-Technology 2007-060

 Development of High-Temperature Joints for Thermochemical Hydrogen Production by IS Process
 Applicability Examination of the Coned-disk Springs Assembly and Seal Performance Test of Candidate Gaskets -

> Akihiro KANAGAWA<sup>\* 1</sup>, Jin IWATSUKI, Shuichi ISHIKURA<sup>\* 1</sup>, Kaoru ONUKI and Ryutaro HINO

> > Nuclear Applied Heat Technology Division Nuclear Science and Engineering Directorate Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

> > > (Received July 25, 2007)

Thermo-chemical Iodine-Sulfur (IS) process can produce large amount of hydrogen effectively without emission of greenhouse effect gas such as carbon dioxide, where nuclear thermal energy of a high temperature gas-cooled reactor (HTGR) is adopted as a heat source. The IS process uses strong acids such as sulfuric acid and hydriodic acid in high temperature and pressure conditions. Therefore, it is necessary to develop large-size chemical reactors featuring materials that exhibit high temperature and corrosion resistance.

A SO<sub>3</sub> decomposer, which is one of key components of the IS process, consists of a pressure vessel for high temperature and high pressure helium gas and an internal structure for SO<sub>3</sub> decomposition by the latent heat of the helium gas. Since joints of the internal structure will be heated up to 700°C, we designed a high-temperature joint coupled with coned-disk springs and SiC bolts (coned-disk springs assembly) so as to keep seal performance under high temperature condition. This report presents applicability examination results of designed coned-disk springs assembly as well as seal performance test results of candidate gaskets.

Keywords: Thermochemical, IS-process, Hydrogen, SO<sub>3</sub> Decomposer, High-temperature Joint, Coned-disk Springs Assembly, Seal Performance, Gasket

\* 1) Cooperative Staff (Advanced Reactor Technology Co., Ltd.)

<sup>\* 1)</sup> Mitsubishi Heavy Industries Ltd. ( stayed at Nuclear Applied Heat Technology Division till March, 2007)

# 目 次

1. は	tじめ	りに・・	••	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	1
2. 高	「温維	迷手の構	造検	討	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	<b>2</b>
2.	1	高温継	手の	構造	皆概:	念。	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	2
2.	2	継手構	造の	応力	J解	析·	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	2
3. 🏾	[バオ	* 締結機	構の	評佰	Fi試!	験		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	9
3.	1	評価試	験内	容	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	9
3.	2	皿バネ	の荷	重閑	<u></u> 皆性	試験	矣	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	9
3.	3	SiC ボ	ルト	軸大	]確詞	認診	弋験	i (	常	温	)					•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	9
3.	4	締結機	構の	高涯	1健	全性	主及	ζŰ	シ	<u> </u>	ル	性	評	価	試	験				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	10
	~ `				- 1	<b>A</b>								_			_														
4. バ	パト	ュットブ	ラン	卜道	国 取 記	条作	<b>キ</b> に	17	け	3	IJ		ク	量	$\mathcal{O}$	詊	価			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	16
4.	1	リーク	量の	推貨	訂式			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	16
4.	2	リーク	孔径	の評	平価			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	17
4.	3	運転条	件に	おけ	ける	漏≵	し量	評	価	ĺ		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	17
5. 名	「種力	ゴスケッ	ト候	補む	れの	シー	- <i>1</i> 1	~性	能	評	価					•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		19
5.	1	ガスケ	ット	候補	, 首材			•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	•	•	•					•	•	•	19
5.	2	のリン	グの	シー	-12'	性意	式縣	討	课			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	19
5.	-3	カーボ	シシ	- ŀ	、 の	シー	-1l	~性	:試		結	果				•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•		•	•	20
5.	4	金コー	ティ	ング	が 金	· 属(	7.1	レン	15	řσ	)シ	/_	- <i>1</i> L	州	:늶	詠	結	课	Ļ	•	•	•		•	•	•	•		•	•	20
5.	5	一鉱物系	ガス	ケッ	ノト	(サ	_	3 :	+:	1 <sup>2</sup>	7/	1	۲ (۲	っ の	シ	_	IV	性	試	験	結	果		•	•	•	•	•	•	•	21
5.	6	シール	性試	験 σ	・ )ま	لى لى م	5		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•		•	•	•	•	22
			1		9.	-																									
6.ま	ミとめ	5	••	•••	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	30
謝辞					•		•		•	•	•	•	•	•		•			•	•	•		•				•	•	•	•	30
参考文	「献		••		•		•	•		•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•		•	•		•	•	•	•	30

## Contents

1. Introduction ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	1
2. Investigation of design of the coupling for high temperature ••••••••	2
2.1 Design concept of the coupling	2
2.2 Structural analysis of the coupling ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	2
3. Evaluation test of the coned-disk springs assembly ••••••••••	9
3.1 Contents of the test $\cdots \cdots \cdots$	9
3.2 Load test of the coned-disk springs	9
3.3 Measurement of tensile stress of SiC rod •••••••••••••••••••••••••••••••••••	9
3.4 Result of the heating test of the test assembly ••••••••••	10
4. Estimation of the leakage loss of He under the pilot plant condition •••••	16
4.1 Prediction formula for the leakage	16
4.2 Estimation of the size of the pathway ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	17
4.3 Estimation of the leakage loss	17
5. Preliminary test of the gaskets ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	19
5.1 Gaskets candidate	19
5.2 Result for a O-ring • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	19
5.3 Result for a graphite seat gasket	20
5.4 Result for a gold coated metal C-ring · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	20
5.5 Result for a mineral gasket • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	21
$5.6$ Summary $\cdot \cdot \cdot$	22
6. Concluding remarks	30
Acknowledgements · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	30
References · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	30

### 1. はじめに

日本原子力研究開発機構(原子力機構)では、高温ガス炉からの核熱を熱源として地球温暖化 ガスである二酸化炭素を排出することなく大量の水素を効率的に製造することが可能な熱化学法 IS (Iodine-Sulfur)プロセスの研究開発を進めている。IS プロセスは、硫黄とヨウ素を循環物 質として、高温ガス炉から得られる1000℃以下の核熱を用いて水を分解して水素を製造する方法 である。これまでに、IS プロセスの基本反応及び分離操作を組み合わせた実験室規模の水素製造 実験が行われ、反応に関与する硫酸やヨウ素などの循環物質をほとんど損なうことなく連続的に 水を分解できることを実証してきた<sup>(1)</sup>。

IS プロセスは強酸である硫酸やヨウ化水素酸を高温高圧下で使用するため、耐熱性に加えて耐腐食性の材料で大型化学反応器の開発が必須である。とくに、IS プロセスの主要機器である SO3 分解器は、高温高圧の He ガス用の圧力容器と He ガス加熱による SO3 分解のための内部構造物 から構成され、内部構造物の接続部は最高 700℃にまで達する。構造物のシール性能を確保する ために一般的に増し締めを行うが、このような高温条件において内部構造物の増し締めはほぼ不可能である。そこで、常温で検査した耐圧・気密性能が高温まで維持できるように、SiC ボルトと皿バネを用いた高温継手機構を考案した。

本報では、考案した高温継手の有効性確認試験結果と候補となるガスケットのシール性能試験結果について報告する。

### 2. 高温継手の構造検討

### 2.1 高温継手の構造概念

シール性の課題はガスケットの材質が注目されるが、高温条件下ではシール性能を維持する上 でシール材を押し付ける力を確保することが重要である。通常の耐圧機器の継手部は運用期間中 の増し締めによりシール性能を維持することが一般的であるが、He ガス加熱方式の IS プロセス では反応機器は耐圧容器内に収納されるため、運用途中の増し締めはできない。このため、高温 条件でもシール性能が変化しないように、シール材を押し付ける力(面圧)を維持できる機構の 開発が必要となる。

IS プロセスにおいて特に厳しい腐食環境にある硫酸濃縮器、同蒸発器、SO<sub>3</sub>分解器及び HI 分 解器は SiC 等のセラミクスで製作することが検討されている。したがって、配管との接続部では セラミクス配管どうし、若しくは、セラミクス配管と金属配管とのフランジ接続機構が必要とな る。通常、フランジの締結には金属製ボルトとナットが使用されるが、SiC セラミクスの線膨張 係数は耐熱金属のそれに比べて 1/3 から 1/4 程度小さいため、耐熱金属製のボルトを使用する と高温条件下ではボルトが膨張し面圧が低くなる問題がある。

このため、IS プロセス用に高温条件下での面圧を維持する機構として、SiC セラミクス製ボルトを使用した締結機構を考案した。この構造の詳細を以下に示す。また、後述する評価試験に使用するため製作した締結部の構造を図 2.1 に示す。

- (1)両端に大きさの異なるヘッド部を持つ SiC ロッドを、小さいヘッド部側からフランジ孔をとおす。フランジと SiC ロッドとは大きなヘッド部で接触する。ロッド部とフランジ孔間のスペースには分割式スペーサを入れ位置を固定する。
- (2) 小さいヘッド側から、これよりも内径の大きい皿バネを重ねる。皿バネとロッド部の空間にも分割式スペーサを入れ皿バネのずれを防止する。
- (3) 皿バネの上部と SiC ロッドヘッド部の間に耐熱金属製の分割式ボルトを装着する。ボルトのねじ部は小さい側のヘッド径よりも外側に位置するように製作することにより、耐熱金属製ナットの内径をヘッド部より大きくしても締め付けが可能となる。
- (4) ナットを締付けていくと、ナット部で皿バネを、ボルト部で SiC ロッドのヘッド部に力 がかかり、フランジに締付け力が付与される。

この構造の特徴は、高温下での金属とセラミクスの熱膨張差による締付け力(軸力)の変化を、 複数枚の皿バネのたわみを利用し解消しようとするものである。ちなみに、皿バネを重ねて厳し い環境に対応させる例としては、人工衛星に搭載する宇宙望遠鏡の駆動機構や鉄道車両用ブレー キなどがある。

### 2.2 継手構造の応力解析

皿バネを使用する場合には、ガスケットの必要面圧に対応するように適正な最小締付け力が設 定されるが、SiC ボルトの引張り応力に上限があるため、これを越えないように温度変化による 締付け力の変化を適正範囲に収める設計する必要がある。皿バネのたわみと荷重の特性は Almen-Laszloの式で評価できることが知られている<sup>(2)</sup>。この関係式を表 2.1<sup>(3)</sup>に示す。

図 2.1 に示す締結機構の熱伸び吸収特性等を表 2.2 に示す解析条件で評価した。解析結果を図 2.2~2.4 に示す。図 2.2 に示すとおり、皿バネの枚数を増やすとボルト軸力は温度による変化が 小さくなることがわかる。今回の設計では、皿バネ枚数をできるだけ少なくする観点からこれを 10 枚とし、これにより最高使用温度である 700℃での締付け力の変化を常温の締付け力に対して 40%以下(変動比:1.4 以下)に抑えた。また、ボルト軸力は初期の皿バネ締付け量に依存し、許容軸力以下に抑える必要があるが、これが小さいと現場施工性は悪くなる。図 2.3 及び図 2.4 に示すように、本設計では軸力の許容範囲で施工性も確保できる締付け量として 1mm を設定し た。これは、今回使用した M26 ボルトの細目ねじで 1 回転分に相当する。



表 2.1 Almen-Laszlo の式による皿バネの荷重・応力計算式<sup>(3)</sup>

解析条件	設定値	備考		
皿バネ材質	インコネル750			
厚さt(mm)	2.5			
外形D	38.5			
内径d	23.5			
密着たわみ量h	0.5			
縦弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )	213640	室温		
	184240	500°C		
	165620	700°C		
ポアソン比 <i>ν</i>	0.3			
面取りR	0.2			
	1.638			
荷重係数 C	1.696			
SiC 線膨張係数	4.70E-06			
耐熱金属線膨張係数	1.84E-05			
SiC ボルト軸長さ(mm)	138			
金属部長さ(mm)	85			
並列枚数n	1			
直列枚数m	2~15	パラメータ		
初期締付け量(mm)	0.5~1.5	パラメータ		

### 表 2.2 熱伸び吸収特性等の解析条件および評価項目

評価項目	パラメータ	備考
ボルト軸力の室温からの変化率	さらばね枚数	
	締結部温度	
	初期締付け量	
ボルト軸力	締結部温度	
	初期締付け量	



図 2.1 高温締結機構の構造(試作品組立図)



図 2.2 皿バネ締結機構の解析評価結果(皿バネ枚数とボルト軸力の関係)



(ボルト軸力の皿バネの初期締め付け量および温度との関係)





### 3. 皿バネ締結機構の評価試験

### 3.1 評価試験内容

2 章の高温継手の構造検討で示した考案した締結機構の有効性を検証するため、新たに締結機 構を製作し試験を実施した。図 3.1 に製作した締結部品と組立て後外観の写真を示す。なお、本 締結機構の評価にはボルトのひずみなどから高温時の軸力を計測することが直接的な評価方法と 考えられるが、この場合、高温用のひずみゲージをボルトに溶接する必要がある。SiC ボルトに はこの方法が採用できないため、今回は、皿バネの荷重特性並びに SiC ボルトの常温における締 め付け量と軸力の関係を実験にて確認すると共に、実プラントで使用するガスケットと組合せて シール性試験を行い、高温時にもシール性とボルトの健全性が確保できることをもって本締結機 構の有効性を評価することとした。試験項目を以下に示す。

- 耐熱金属製皿バネの荷重特性試験
- ② SiC ボルト軸力確認試験(常温)
- ③ 締結機構の高温健全性及びシール性評価試験
- 3.2 皿バネの荷重特性試験

今回準備した皿バネは、その荷重特性(たわみと荷重の関係)をアルメン・ラズロの式で評価 し、皿バネ寸法、枚数、初期締付け量等を設定したものである。本試験は、昇温試験に先立ち皿 バネの荷重特性を確認するため行ったものである。試験条件を以下に示す。試験の結果、図 3.2 に示すとおり準備した皿バネのたわみと荷重の関係は設計どおりであることが確認できた。

- ① 荷重負荷装置:SHIMADZU 製 AGS-20 k NG
- ② 最大荷重: 7000N とする。
- ③ 荷重負荷モード:サイクリック(ただし、計測は1サイクル)
- ④ 荷重負荷速度: 0.1mm/1min

### 3.3 SiC ボルト軸力確認試験(常温)

図 2.1 に示す締結構造の SiC ロッドにひずみゲージを貼付し、ボルトの締め付け量と SiC ロッドのひずみ量の関係からボルト軸力を算出した。SiC ロッドには、引っ張り力のほか、ボルトを回すことによる回転力、前後左右のずれによる曲げ力が発生するため、これらを補正可能な 4 ゲージアクティブ法を採用した。試験方法及び軸力換算のための計算条件をまとめて表 3.1 に示す。

試験はデータのばらつきがやや大きく出たため、9回繰り返して行った。試験結果を図 3.3 に 示す。SiC ボルトの軸力は設計値に対して 5~30%程度小さくなる結果となった。このばらつき は、10 枚重ねた皿バネと位置決め用のスペーサのクリアランスを十分な余裕があるように設定し たことにより、皿バネの位置が個々にずれ易くなって、このずれが試験毎に異なった状態で生じ た結果生じたものと推定される。また、このずれのためにボルトの締付け量が皿バネのたわみに 反映されず、軸力が設計値よりも小さくなる結果となったものと考えられる。実機の設計におい ては、これらのばらつきを考慮して余裕を持った構造を採用すると共に、ばらつきを小さくする ための工夫を加えることが望ましい。

3. 4 締結機構の高温健全性及びシール性評価試験

上述の皿バネ荷重特性試験で常温時の特性は設計どおりであることが確認できたので、次ステ ップとして昇温時の本締結機構の有効性を確認する試験を行った。具体的には以下の条件で締結 機構の昇降温を繰返し、1回ごとに破損の有無を確認すると共に昇降温時には He リーク試験に よるシール性の変化を評価した。試験装置構成を図 3.4 に、試験の状況を図 3.5 に示す。He リー ク試験方法は、「JIS Z2330 ヘリウム漏れ試験方法の種類及びその選択」にある真空外覆法を採 用した。

① ガスケット:カーボンシートガスケット (東洋炭素製 PF-100UHP)

寸法 外径 40mm、内径 30mm、厚さ 1.5mm

- ② フランジ材質:SiC セラミクス
- ③ 試験温度:室温~530℃、120℃/h
- ④ 試験方法:真空フード法による He リーク試験(電気炉内を He で充満)
- ⑤ サンプリング周期:10秒
- ⑥ 皿バネ初期締め付け量:1mm

→ SiC ボルトの室温時軸力 1800N、500℃時軸力 2410N、(許容軸力 3000N)

5回のサイクル試験を行った結果、SiC ボルトは破損することはなく健全であったことから、 高温時においても軸力は許容範囲内であったと考えられる。

He リーク試験結果を図 3.6 に示す。これを見ると、昇温時と降温時で挙動が異なるが、降温時 は比較的一致した挙動が得られた。昇温時に比べて降温時のほうが温度の均一性がよいことなど により安定的なデータが得られたものと推定されるが明確な原因は不明である。降温時、500℃ から 200℃の範囲において He リーク量の温度依存性は小さくなる結果を得られた。この温度範 囲において軸力の変化は、図 2.4 に示すとおり 1.2 倍程度と予測できるので、この効果によりリ ーク量の変化も小さくできたものと考えられる。 表 3.1 SiC ボルト軸力の計測方法及び評価条件





(a) 製作した締結部品



(b) 組立て後外観

図 3.1 製作した締結部品と組立て後の外観







図 3.3 SiC ボルト軸力確認試験結果



図 3.4 He リーク試験装置構成



図 3.5 試験状況(電気炉内にフランジを設置した状況)

昇温時の比較



降温時の比較



図 3.6 高温 He リーク試験結果(カーボンガスケット)

4. パイロットプラント運転条件におけるリーク量の評価

3 章の皿バネ締結機構で行った He リーク試験は、試験装置である配管内を真空引きして外 周から漏れて入る He を計測するものである。そこで、IS プロセスの実条件下でのリーク量、 すなわち、最大 2MPa で配管内からプロセスガス又は液体が漏れる条件、若しくは、He との 熱交換器で想定される 4MPa の He がプロセス内に漏れる条件におけるリーク量を試験データ から推算する。

4.1 リーク量の推算式

リーク量の定量化には一般にリーク孔を流体が通り抜けることによる圧力の変化や流体の通過 量が用いられる。今回のHeリーク試験もリーク孔を通過するHeの通過量Qを定量化している。 また、得られたHeリーク量と圧力差からコンダクタンスC(リーク孔形状等に依存する)を求 めることにより実条件でのリーク量を推算することが可能となる<sup>(4,5)</sup>。

$$Q = C (P1 - P2)$$

(4.1)

ここで、Q:リーク量 (Pa m<sup>3</sup>/s) C:コンダクタンス (m<sup>3</sup>/s) P1,P2: 圧力 (Pa)

リーク孔を通過する気体量は、流れが粘性流か分子流かで異なってくる。IS プロセスのように 高圧条件で使用する場合には粘性流のみを考慮すればよいが、今回の He リーク試験条件のよう に大気圧から真空に変化するような場合には両方の特性を考慮する必要がある。このような広い 圧力範囲で成り立つ半理論式として Knudsen の式が知られている<sup>(6)</sup>。

$$C = \frac{\pi}{128} \frac{D^{4}}{\eta L} \overline{P} + \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \cdot \frac{D^{3}}{L} \cdot \frac{1 + \sqrt{\frac{M}{RT}} \cdot \frac{PD}{\eta}}{1 + 1.24 \sqrt{\frac{M}{RT}} \cdot \frac{PD}{\eta}}$$
(4.2)
  
ここで、D: リーク孔直径 (m)
  
η: 粘性係数 (Pa·s)
  
L: リーク孔長 (m)
  
 $\overline{P}: 平均圧力 = (P1+P2) / 2$ 
  
R: 気体定数 (8.31 J/mol K)
  
T: 温度 (K)
  
M: 流体の分子量

上記の Knudsen 式を用いることにより3章の皿バネ締結機構の試験結果からリーク孔径を求 めることができる。このリーク孔径を使用して、実条件でのリーク流体の圧力、温度、粘性係数 等を用いて Knudsen 式から実条件でのリーク量を推算することが可能である。ただし、液体の リークについては表面張力や壁面との親和性がリーク量に強く影響するため Knudsen 式で推測 したリーク量は極めて保守的な値を与える。

4.2 リーク孔径の評価

3 章の皿バネ締結機構の評価試験における He リーク試験結果のうち、比較的温度条件が揃う 傾向にある降下時のデータからリーク孔径を評価した結果を図 4.1 に示す。なお、リーク孔長は ガスケット幅相当の 5mm として評価した。図 4.1 において温度が高くなるとリーク孔径はやや 大きくなるものの 300℃以上の条件でリーク孔径の増大傾向が緩和される結果となっている。図 2.3 及び図 2.4 に示すとおりボルト軸力は温度が高くなると増加する傾向にあり、この効果によ ってリーク孔径は小さくなると予想していたが、結果は逆の傾向となった。リーク量はガスケッ トの面圧だけでなく、ガスケットとフランジとの親和性などの影響も受けるので、高温条件にな ることによりガスケットとフランジ面との親和性が変化した可能性が考えられる。

4.3 運転条件における漏れ量評価

カーボンガスケットは HI 系への適用が想定されているので、HI 分解器における He のプロセス側への漏れ量を推定する。なお、運転条件においては圧力が高いため漏れの流れ形態は粘性流と見なすことができる。評価条件は以下とする。

① He 圧力: 4MPa (G)

- ② プロセス圧力: 2MPa (G)
- ③ シール部温度:450℃
- ④ リーク孔径:16µm

この条件を Knudsen 式に当てはめ年間の He の漏れ量を評価した結果、カーボンガスケット1 か所当たり約 6.2 Nm<sup>3</sup>とほぼ He ボンベ1本分であり、実用に際しては十分無視できる程度と推定される。



図 4.1 カーボンシートガスケットのリーク孔径評価結果(温度依存性)

5. 各種ガスケット候補材のシール性能評価

5.1 ガスケット候補材

パイロットプラントに使用するシール材は使用される環境においてシール性、耐食性、耐圧性 を確保する必要がある。表 5.1 に各種ガスケットの適用性とこれまでの使用実績を示す。表より、 腐食の観点から流体により使用できる材料が異なる。硫酸系、HI 系それぞれについて候補となる シール材を以下に記す。なお、O リングや C リングタイプのガスケットは一般に溝付きフランジ に適用され、フランジ同士は面タッチする条件で使用されるため締付け力は試験パラメータには ならないが、グラファイト等のシートガスケットタイプでは締付け力は重要なパラメータとなる。

① HI 系(I<sub>2</sub>凝縮器)

候補材はグラファイト及び Ta がある。また、低温域であれば O リング (カルレッツ、 パーフロ)や PTFE 包みガスケット (ゴアテックス)等も使用可能である。グラファイト や Ta は C リングや O リングのような形状で適用することはできないので、シール方法と してはシートガスケットタイプとなる。今回は、一般的なガスケット材である O リングと グラファイトシートガスケットについて評価した。なお、グラファイトについては 3 章の 皿バネ締結機構で述べた He リーク試験に加えて、SUS フランジとボルトを用いてさらに 締付け力を高くした条件での評価を追加した。

② 硫酸系(硫酸濃縮塔、硫酸分解器)

耐食性の観点から接液部の候補材は金及び鉱物系ガスケット(サーミキュライト)となる。また、HIと同じく低温域であればOリング(カルレッツ、パーフロ)や PTFE 包み ガスケット(ゴアテックス)等も使用可能である。シール方法としては、金についてはこ れをコーティングした金属Cリングタイプ及び金ワイヤ又はリングのシートガスケットタ イプ、鉱物系ガスケット(サーミキュライト)はシートガスケットタイプとなる。今回は このうち金コーティングCリング及びサーミキュライトについて評価した。

5.2 0リングのシール性試験結果

O リングのシール性は 3 章の皿バネ締結機構で述べたカーボンガスケットと同様に、「JIS Z2330 ヘリウム漏れ試験方法の種類及びその選択」にある真空外覆法Heリーク試験を採用した。 試験条件を以下に示す。

- ① ガスケット:パーフロ製0リング
- ② フランジ:SUS 製
- ③ ボルトナット: SUS 製
- ④ 試験温度:室温
- ⑤ 試験方法 : 真空フード法による He リーク試験(フランジ部をビニール袋で覆い He を導入)
- ⑥ データサンプリング周期:10秒

ビニール袋内に He を導入してからの He リークディテクタの指示値の変化を図 5.1 に示す。 この結果、He リーク速度は 1.2×10<sup>-8</sup> Pa m<sup>3</sup>/s 程度の結果を得た。これは 3 章の皿バネ締結機 構において評価したカーボンシートガスケットのリーク量に比べて 3 桁以上低い値である。

5.3 カーボンシートのシール性試験結果

カーボンシートガスケットの所要面圧は 10~200MPa とされるが、3 章の皿バネ締結機構にお いて試験した締結構造においては SiC ボルトの軸力の制限から室温で 18MPa、500℃で 25MPa 程度と低い値に止まっている。シートガスケットのシール性能を O リングに近づけるためには面 圧を上げる必要があることから、金属製のボルトとフランジを用いたシートガスケットの面圧依 存性試験を行った。試験条件は以下のとおりである。

① ガスケット:カーボンシートガスケット (東洋炭素製 PF-100UHP)

寸法 外径 40mm、内径 30mm、厚さ 1.5mm

- ② フランジ材質:SUS 製+SiC セラミクス製
- ボルト材質: SUS 製
- ④ 試験温度:室温
- ⑤ 試験方法:真空フード法による He リーク試験(フランジ部をビニール袋で覆い He を導入)
- ⑥ データサンプリング周期:10秒

試験は、10Nmから30Nmまで5Nm刻みで段階的に締付けていき、その都度Heリーク試験 を行った。締付けトルク30Nmはボルト1本あたりの軸力として10,000Nに相当する(ボルト サイズM20の場合)。また、軸力を緩和する場合には、締まっているボルトの1本を一旦完全に 緩めた後、設定トルクまで締め直す操作を全てのボルトについて行った後、Heリーク試験を実 施した。なお、上限トルクは通常の作業条件でレンチを使用して締付ける場合を想定し30Nmと 設定した。

試験結果を図 5.2 に、試験前後のガスケットの外観を図 5.3 に示す。今回の試験で最大軸力は 10,000N と SiC ボルトの約 4 倍を得られた。この結果、リーク量は 1/5 に減少した。また、軸 力緩和時にはリーク量の変化は小さくなる傾向も認められた。図 5.4 に Knudsen の式を用いて リーク孔径を評価した結果を示す。軸力を 3,300N から 10,000N に増加させることにより、リー ク孔径は 18µm から 12µm と約 2/3 になった。また、軸力緩和時には 11µm から 12µm と変化 は小さくなっている。これは、ガスケットの緩和率が小さいことから、軸力が小さくなっても圧 縮時の状態を維持しているためと考えられる。

5. 4 金コーティング金属 C リングのシール性試験結果

金属 C リングは液体硫酸と接する部分のガスケット材として検討されているものである。試験は、フランジを面タッチさせた条件で昇降温を繰返し He リーク量の変化を測定した。試験条件を以下に示す。

- ① ガスケット:金コーティング金属Cリング(耐熱金属 ハステロイX)
- ② フランジ:SUS 製
- ③ ボルトナット: SNB16
- ④ 試験温度:室温~530℃(5回繰返し)
- ⑤ 試験方法:真空フード法による He リーク試験(電気炉内を He で充満)
- ⑥ データサンプリング周期:10秒

金属 C リングの He リーク量は He リークディテクタの計測ばらつきの範囲に常時入っていた ため、正確なリーク量の評価は困難であった。この結果は金属 C リングの優れたシール性を示す ものであり、O リングのリーク量に比べて 2 桁近く低い結果となった。He リークディテクタの 指示値とフランジ部の温度の変化を併せて図 5.5 に示す。また、試験前後の金属 C リングとフラ ンジの外観を図 5.6 に示す。リーク量の変化は試験室の扉の開閉状況など室内の換気状態に依存 するものであるが、10<sup>-10</sup>Pa·m<sup>3</sup>/s 台での変化であり、ごく微量である。

なお、図 5.7 に示すとおり、金と Si は約 400℃で共晶化することが知られており<sup>(7)</sup>、金コーテ イング金属 C リングを SiC セラミクスフランジと組合せて使用するときには注意が必要である。 図 5.8 に、いくつかの SiC サンプルと金の共晶化について簡易に評価した結果を示す。これは、 幅 5mm、厚さ 1mm の純金板を SiC サンプルに押し付けた状態で所定温度に加熱後、接触面の 観察をしたものである。この結果、金と SiC セラミクスが固着する状況が見られており、使用条 件によっては金コーティングを破損させる可能性があることを示されたことから、実機での使用 にあたっては実環境での適用性を確認する必要と考えられる。

5.5 鉱物系ガスケット(サーミキュライト)のシール性試験結果

サーミキュライトは硫酸系でグラスライニングに適用可能なガスケット材として検討されてい るものである。試験条件を以下に示す。

① ガスケット:サーミキュライト

寸法 外径 40mm、内径 30mm、厚さ 1.5mm

- ② フランジ材質:SUS+SiCセラミクス、又は、SUS
- ③ ボルト材質: SUS
- ④ 試験温度:室温
- ⑤ 試験方法 : 真空フード法による He リーク試験(フランジ部をビニール袋で覆い He を導入)
- ⑥ データサンプリング周期:10秒

He リーク試験結果を図 5.9 に示す。また、試験後のガスケットの外観を図 5.10 に示す。軸力 の小さい範囲ではカーボンガスケットに対して 1 桁程度大きなリーク量を示たため、フランジ材 を SUS+SiC セラミクスの組合せから SUS+SUS の組合せに変更し、さらに高い軸力を負荷す る試験を行った。締付け力が増大することによりリーク量は直線的に小さくなり、O リングと同 等のシール性を示した。また、その後緩める方向では比較的良好なシール性を維持できている。 5.6 シール性試験のまとめ

今回の試験では、HI系のガスケット材としてカーボンシートを、また、硫酸系として、金コー ティング金属 C リングと鉱物系ガスケット(サーミキュライト)のシール性について評価し、低 温条件では両方に使用可能なパーフロ O リングのシール性と比較した。

カーボンシート及びサーミキュライトについては O リングのシール性に及ばなかったものの、 軸力を増加し面圧を高く取ることによりシール性を向上できることが確認された。例えば、カー ボンシートの場合、軸力を 10,000N まで増加させることによりリーク量を 1/5 に低減でき、こ れは実機における He の年間漏れ量として、1.2Nm<sup>3</sup>程度となり十分許容できる範囲と考えられる。 SiC ボルトを用いて同等のシール性を得るためには、ボルトの本数及び断面積を変更することで 可能である。ただし、500℃までの範囲であるならば、コスト的に有利な耐熱金属ボルトと皿バ ネを組合せた締結構造も使用可能である。

なお、フラットなフランジに挟み込む形で使用されるカーボン及びサーミキュライト製のシー トガスケットは、念のため最大4MPaの耐水圧試験を室温で実施し、構造上問題のないことを確 認している。

	杵	漏ん																			
	中住	大藏中	工学基礎試験装	置(JOIS)	硫酸ループ		SO3 ループ		材料試験高圧才	ートクレーブ	東芝社耐圧試験							材料試験高圧才	ートクレーブ	シール性試験	
	~ 田 / 田 //	少女々年時に見			4MPa 耐圧		650°C以上のシール性	金-Si 共晶効果	450°C以上のシール性		500°C以上のシール性	金-Si 共晶効果	私ィーベ		耐食性、シール性、耐圧		科イーぐ				
	(L:液、V:蒸気)	送 개	L:~200°C		L:~300°C		不可		但业		不可		巨业		不明		L∕∕V∶~450°C	L∕V:~450°C		L∕∕V: ~450°C	
	適用温度範囲	硫酸系	L: ~200°C		L:~300°C		L∕∕V : ~850°C		L∕∕V : ~850°C		L∕∕V: ~850°C		V∶~850°C		L∕∕V : ~850°C		不可	不可		不可	
Ī	Ń	トラミクス	0		0		0		×		0		0		0		ذ ×	×		0	
	「用フラン	闺寽	0		0		0		0		0		0		0		0	0		0	
	遺	GL	0		0		×		×		×		×		0		×	×		0	
	ボット…」	していくて	0 リング (カルレッツ)		PTFE 包みガスケット	(ゴアテックス)	金属 C リング(金メッ	(+	金属山型/平型ガス	ケット(金メッキ)	結金レイヤ		耐熱金属 C リング(メ	ッキなし)	鉱物系シートガスケ	ット(サーミキュライト)	Ta ワイヤ	Ta 山型/平型ガスケ	ット	カーボンシート(東洋	炭素製)

表 5.1 各種ガスケットの適用性とこれまでの使用実績



図 5.1 Oリングの He リーク試験結果(室温)



図 5.2 カーボンシートガスケットの He リーク試験結果 (室温、ボルト軸力依存性)



(a) 試験前









図 5.4 カーボンガスケットのリーク孔径評価結果(軸力依存性)



図 5.5 金コーティング金属 C リングの He リーク試験結果(昇降温試験)



(a) 試験前

(b) 試験後

図 5.6 金コーティング金属 C リングの外観



図 5.7 Au-Si 状態図<sup>(7)</sup>



図 5.8 Au-Si 共晶化の簡易試験結果



図 5.9 鉱物系ガスケット(サーミキュライト)のシール性試験結果(室温)



(a) 表面

(b) 裏面

図 5.10 鉱物系ガスケット(サーミキュライト)の試験後の外観

### 6. まとめ

IS プロセスは高温ガス炉と組合せることにより、原子炉から得られる核熱を用いて水素を効率 的に製造する方法として極めて有望な化学プロセスである。しかしながら、腐食性の高い環境下 で運転されるため、各機器を接続する継手機構にも同様の耐食性が要求される。また、高温環境 下でもある上、耐食材料として使用が検討されている SiC セラミクスは熱膨張率が金属の 1/3 から 1/4 程度と小さいため、金属ボルトを使用すると面圧が低下する傾向にある。高温配管は 一般に断熱材で覆われるため、増し締め等の操作が困難となることから、増し締めを必要としな い締結機構の開発が望まれている。

そこで、高温時にも面圧を維持できる構造について検討した結果、皿バネと SiC セラミクス製 ボルトを用いた締結機構を考案した。本締結方式について構造解析を行うと共に試作して構造の 成立性を評価した。この結果、適切なガスケット材と組合せることにより、高温時でもシール性 は維持できることが確認された。

また、HI系、硫酸系それぞれについて候補となるガスケット材を抽出し、そのシール性につい て評価した結果、試作した構造より面圧を高くすることが必要になるものの、Heの年間漏れ量 として、1.2Nm<sup>3</sup>程度と十分許容できる範囲に収まる見通しを得られた。また、500℃までの範囲 であるならば、耐熱金属ボルトと皿バネを組合せることにより、コスト面でも有利な締結機構に 目処を得ることができた。

### 謝 辞

本報をまとめるにあたり、(独)日本原子力研究開発機構 原子力基礎研究部門 核熱応用工学ユ ニット ガス炉 IS プロセス接続技術開発グループリーダ 稲垣嘉之氏に貴重なご助言を頂きまし た。また、三菱重工業(株)神戸造船所原子力水素 Pj 室の各位には、皿バネ締結機構の設計、試作 品の製作にご尽力を頂きました。He リーク試験では原子力エンジニアリング(株)の照沼孝志氏 の多大な支援を頂きました。ここに記して深く感謝いたします。

### 参考文献

- S. Kubo et. al., "A demonstration study on a closed-cycle hydrogen production by thermochemical water-splitting Iodine-Sulfur process", Nucl. Eng. Des., Vol.233, pp.347-354 (2004).
- (2) JIS に基づく機械システム設計便覧、日本規格協会、pp.835-842 (1986).
- (3) さらばねテクニカルガイダンス、東海バネ工業株式会社、p.3
- (4) 真空工学ハンドブック、朝倉書店、p.19 (1965).

- (5) 真空技術の基礎・応用及びトラブル対策、ソフト技研出版部、pp.127-138 (1986).
- (6) 真空工学ハンドブック、朝倉書店、pp.315-317(1965).
- (7) 金属データブック 日本金属学会編、丸善株式会社、p.489 (1993).

This is a blank page.

表	1.	SI	基	本	単位	Ż		
其木-		SI 基本単位						
25/ <del>1</del> * 1		名	記号					
長	Q	メ	_	F	ル	m		
質	量	キ	ロク	ブラ	$\mathcal{L}$	kg		
時	間		耟	少		S		
電	流	P	$\boldsymbol{\succ}$	$\sim$	$\mathcal{P}$	А		
熱力学	昷度	ケ	ル	ビ	$\boldsymbol{\mathcal{V}}$	Κ		
物質	量	モ			ル	mol		
光	度	力	$\boldsymbol{\mathcal{V}}$	デ	ラ	cd		

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の
-------------------------

如去量	SI 基本単位									
和业里	名称	記号								
面 積	平方メートル	m <sup>2</sup>								
体 積	立法メートル	m <sup>3</sup>								
速 さ , 速 度	メートル毎秒	m/s								
加 速 度	メートル毎秒毎秒	$m/s^2$								
波 数	毎 メ ー ト ル	m-1								
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	$kg/m^3$								
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg								
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>								
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m								
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	$mo1/m^3$								
輝 度	カンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$								
屈 折 率	(数 の) 1	1								

表 5. SI 接頭語 乗数 接頭語 記号 乗数 接頭語 記号  $10^{24}$ V  $10^{-1}$ d  $10^{21}$ ゼ Ą Ζ  $10^{-2}$ セ 2 с Ŧ  $10^{18}$ サ  $10^{-3}$ Т カ Е 1 m  $10^{15}$ タ Р  $10^{-6}$ マイ クロ μ 10-9  $10^{12}$ テ ラ Т ナ n 10<sup>9</sup> ギ ガ G  $10^{-12}$ Ľ р  $10^{-15}$ × ガ フェム  $10^{6}$ М f  $10^{3}$ 丰 k  $10^{-18}$ 7 а  $10^2$ ク  $10^{-21}$ ゼ ブ ŀ h z

### 表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

			SI 組立単位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
	· [1 · [1	рш., <b>ў</b>	表し方	表し方
半 面 角	ラジアン (1)	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(0)}$
立 体 角	ステラジアン®	sr <sup>(c)</sup>		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周 波 数	ヘルッ	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	Ν		m•kg•s <sup>-2</sup>
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	$N/m^2$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N•m	m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-2</sup>
工 率 , 放射 東	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷, 電気量	クーロン	С		s•A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵扩	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot \Lambda^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁床	ウェーバ	Wb	V•s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	$Wb/m^2$	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C		K
光 味	ルーメン	1m	$cd \cdot sr^{(c)}$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
照度	ルクス	1x	$1 \text{m/m}^2$	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
(放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 質量エネル	JT 1. 1	C	т /1	2 -2
ギー分与, カーマ		Gy	J/Kg	m•s
線量当量,周辺線量当				
量,方向性線量当量,個	シーベルト	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
人線量当量,組織線量当				

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 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"1"は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

组去县		SI 組立単位								
祖立重	名称	記号	SI 基本単位による表し方							
粘度	パスカル秒	Pa•s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$							
カのモーメント	ニュートンメートル	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$							
表 面 張 力	ニュートン毎メートル	N/m	kg • s <sup>-2</sup>							
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$							
角 加 速 度	ラ ジ ア ン 毎 平 方 秒	$rad/s^2$	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$							
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg • s <sup>-3</sup>							
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$							
質量熱容量(比熱容量),	ジュール毎キログラム	T/(1 V)	2 -2 -2 -2							
質量エントロピー	毎ケルビン	J/ (Kg•K)	m • s • K •							
質量エネルギー	ジュール伝キャガラル	T /1=	2 -2 v-1							
(比エネルギー)	シュール母イログラム	J/Kg	m • s • K •							
劫 仁 道 变	ワット毎メートル毎ケ	W/(m · K)	1 -3 w-1							
	ルビン	#/ (Ш • K)	m•kg•s•k							
体積エマルゼー	ジュール毎立方メート	т /3	-1 1 -2							
平積 工 不 ル イ ー	12	J/m	m • kg • s							
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$							
休 琦 雪 带	クーロン毎立方メート	C (-3								
件 頂 电 刊	1L	C/ m	m · S · A							
雪気亦は	クーロン毎平方メート	$C/m^2$	m <sup>-2</sup> A							
电风及恒	12	С/ Ш	III • S • A							
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$							
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	m•kg•s <sup>-2</sup> •A <sup>-2</sup>							
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mo1	m <sup>2</sup> • kg • s <sup>-2</sup> • mol <sup>-1</sup>							
モルエントロピー,	ジュール毎モル毎ケル	$I/(mol \cdot K)$	m <sup>2</sup> , 1, m , m <sup>-2</sup> , W <sup>-1</sup> , m , 1 <sup>-1</sup>							
モル熱容量	(ビン	J/ (mor · K)	m · kg · s · k · moi							
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> • s • A							
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} \cdot s^{-3}$							
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$							
故 財 輝 庫	ワット毎平方メートル	$W/(m^2 + mr)$	-22 - los3-los3							
ルス 71 が半 戊	毎ステラジアン	π/(m ·sr)	m · m · kg · s -kg · s							

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

 $10^{1}$ 

 $10^{-24}$ 

カ

Ξ

	101014-0	
名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	0	$1^{\circ} = (\pi/180)$ rad
分	,	1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル	1, L	$11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	В	$1B=(1/2)\ln 10(Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で

S1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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 <sup>-19</sup> J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 <sup>-27</sup> kg
天 文 単 位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> m

表8.国際単位系に属さないが国際単位系と

	(所用されるての他の単位									
	名称	記号	SI 単位であらわされる数値							
海		里	1 海里=1852m							
1	ツ	F	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s							
T		Νa	$1 \text{ a=} 1 \text{ dam}^2 = 10^2 \text{m}^2$							
$\sim$	クター	ル ha	$1 \text{ ha}=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{m}^2$							
バ	_	∕V bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa							
オン	- グストロー	ム Å	1 Å=0.1nm=10 <sup>-10</sup> m							
バ	-	ンb	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{m}^2$							

事 0 固右のを称を今ねCCS組立単位

衣 5. 回有の石がを含む000組立単位									
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値					
I	N	グ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J					
ダ	イ	$\sim$	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N					
ポ	P	ズ	Р	1 P=1 dyn • s/cm <sup>2</sup> =0.1Pa • s					
ス	トーク	ス	St	1 St =1 cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s					
ガ	ウ	ス	G	1 G ^10 <sup>-4</sup> T					
I	ルステッ	F	0e	1 Oe ^(1000/4π)A/m					
$\overline{}$	クスウェ	$\mathcal{N}$	Mx	1 Mx ^10 <sup>-8</sup> Wb					
ス	チル	ブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$					
朩		ŀ	ph	1 ph=10 <sup>4</sup> 1x					
ガ		ル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{m/s}^2$					

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例									
名称					記号	SI 単位であらわされる数値			
キ	, <u>–</u>		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq			
$\mathcal{V}$	ン	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$			
ラ				F	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy			
$\mathcal{V}$				A	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv			
Х	線		単	位		1X unit=1.002×10 <sup>-4</sup> nm			
ガ		${}^{\mathcal{V}}$		7	γ	1 γ = 1 nT=10 <sup>-9</sup> T			
ジ	ヤン	/ >	ス キ	-	Jy	$1 \text{ Jy}=10^{-26} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$			
フ	л		$\mathcal{N}$	1		1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m			
メートル系カラット						1 metric carat = 200 mg = $2 \times 10^{-4}$ kg			
F				N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa			
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa			
力			IJ	-	cal				
2	ク		D	$\sim$	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$			

