JAEA-Technology 2019-013 DOI:10.11484/jaea-technology-2019-013



1 MW 核破砕中性子源の 低温水素システム用アキュムレータの改良

Improvement of Accumulator in Cryogenic Hydrogen System Used for 1-MW Pulsed Spallation Neutron Source

麻生 智一	達本 衡輝	大都 起一	川上 善彦
小守 慎司	武藤 秀生	高田 弘	

Tomokazu ASO, Hideki TATSUMOTO, Kiichi OOTSU, Yoshihiko KAWAKAMI Shinji KOMORI, Hideki MUTO and Hiroshi TAKADA

> 原子力科学研究部門 J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン

Materials and Life Science Division J-PARC Center Sector of Nuclear Science Research C

September 2019

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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 Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, 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, 2019

JAEA-Technology 2019-013

1 MW 核破砕中性子源の低温水素システム用アキュムレータの改良

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン

麻生 智一、達本 衡輝*1、大都 起一*2、川上 善彦*2、
 小守 慎司*2、武藤 秀生*3、高田 弘

(2019年6月14日 受理)

大強度陽子加速器施設(J-PARC)物質・生命科学実験施設において1MWの陽子ビームで駆動 する核破砕中性子源では、水銀ターゲットで発生した高速中性子を冷中性子に冷却するために、 液体水素(1.5 MPa、20 K以下)を3基のモデレータに供給し、そこで発生する核発熱(3.8 kW) を強制方式で冷却する低温水素システムを備えている。この低温水素システムでは、核発熱に伴 う系内の圧力変動を低減するためにベローズ構造で圧力を吸収するアキュムレータを採用してい ることが特徴である。しかしながら、初期に使用したベローズで不具合が生じたため、高耐圧、 長寿命のアキュムレータが必要となった。厚肉プレートによる高耐圧性を有する溶接ベローズ(内 ベローズ)の要素技術開発を行い、最適条件を見出すことができた。内ベローズの試作機を製作 し、2 MPaの圧力印加を繰り返す耐久試験により、設計寿命(1万回以上)を満たすことを確認 した。また、その製作法による内ベローズを導入したアキュムレータの組立時、溶接歪等によっ て内ベローズの機能性や寿命に影響しないように、水平・垂直度を0.1°以内に抑えた。改良した アキュムレータは既に約25,000時間(繰り返し伸縮約16,000回(運転中40 mm 伸縮の設計寿 命は 50 万回))の運転を実現できており、2019年1月現在、500 kW ビーム出力で運転中であ る。2018年7月には932 kW ビーム入射した運転を行い、アキュムレータの圧力変動抑制機能が 設計どおりの性能を有することを確認し、今後の高出力において安定運転ができる見通しを得た。

原子力科学研究所:〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

- *1 European Spallation Source ERIC
- *2 原子力エンジニアリング株式会社
- *3 日本アドバンストテクノロジー株式会社

Improvement of Accumulator in Cryogenic Hydrogen System Used for 1-MW Pulsed Spallation Neutron Source

Tomokazu ASO, Hideki TATSUMOTO^{*1}, Kiichi OOTSU^{*2}, Yoshihiko KAWAKAMI^{*2}, Shinji KOMORI^{*2}, Hideki MUTO^{*3} and Hiroshi TAKADA

Materials and Life Science Division, J-PARC Center, Sector of Nuclear Science Research, Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken (Received June 14, 2019)

At Materials and Life Science experimental Facility (MLF) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), a 1-MW pulsed spallation neutron source is equipped with a cryogenic hydrogen system which circulates liquid hydrogen (20 K and 1.5 MPa) to convert high energy neutrons generated at a mercury target to cold neutrons at three moderators with removing nuclear heat of 3.8 kW deposited there. The cryogenic system includes an accumulator with a bellows structure in order to absorb pressure fluctuations generated by the nuclear heat deposition in the system. Welded inner bellows of the first accumulator was failured during operation, forcing us to improve the accumulator to have sufficient pressure resistance and longer life-time. We have developed elemental technologies for manufacturing welded bellows of the accumulator by a thick plate with high pressure resistance, succeeding to find optimum welding conditions. We fabricated a prototype bellows block and carried out an endurance test by adding a pressure change of 2 MPa repeatedly. As a result, the prototype bellows was successfully in use exceeding the design life of 10,000 times. Since distortions given during welding and assembling affect functionality and lifetime of the bellows, we set the levelness of each element of the bellows as within 0.1°. The improved accumulator has already been in operation for about 25,000 hours as of January 2019, resulting that the number of strokes reached to 16,000. In July 2018, we demonstrated that the accumulator could suppress the pressure fluctuation generated by the 932 kW beam injection as designed. As current operational beam power is 500 kW, the current cryogenic hydrogen system could be applicable for stable operation at higher power in the future.

Keywords: Pulsed Spallation Neutron Source, Cryogenic Hydrogen System, Accumulator, Welded Bellows, 1-MW, J-PARC

^{*1} European Spallation Source ERIC

^{*2} Nuclear Engineering Co., Ltd.

^{*3} Nippon Advanced Technology Co., Ltd.

目 次

1.	緒言	·	1
2.	アキ	ュムレータ開発の経緯と課題	4
4	2.1 7	アキュムレータ1号機の不具合	4
4	2.2 7	アキュムレータ 2 号機の製作	5
4	2.3 7	アキュムレータの据付け方法	6
4	2.4 7	アキュムレータ3号機の開発と課題	8
3.	アキ	ュムレータの製作における改良1	3
é	3 .1 7	アキュムレータ 3 号機の組立・製作の流れ1	3
į	3.2 タ	トベローズの製作1	3
	3.2.1	1 外ベローズの概要及び仕様1	3
	3.2.2	2 外ベローズの製作時検査1	5
é	3.3 ₽	ウベローズの製作1	5
	3.3.1	1 内ベローズの概要及び仕様1	5
	3.3.2	2 内ベローズの製作時検査1	8
ė	3.4 7	アキュムレータの組立における水平度測定3	3
4.	工場	製作時の水平度を維持した現地据付け方法4	9
2	1.1 玛	見地据付け要領4	9
2	1.2 □	L場製作時の水平度を維持した据付け5	3
5.	低温	試運転時のアキュムレータの動作5	8
6.	ビー	ム入射運転時の低温水素循環系の性能6	1
7.	まと	හ්6	4
謝	滓		4
参	考文献		5
付約	录 A.	アキュムレータ1号機から3号機の仕様等の比較6	7
付約	录 B.	使用済アキュムレータ2号機の取扱い作業要領7	1

Contents

1.	In	troc	luction			
2.	Hi	istor	y and issues of development of accumulator4			
	2.1	Failure of first accumulator4				
	2.2	Manufacture of second accumulator5				
	2.3 How to installation of accumulator					
	2.4	De	velopment issues of third accumulator			
3.	In	npro	vement in manufacturing of accumulator13			
	3.1	Ass	sembly and manufacture flow of third accumulator13			
	3.2	Ma	nufacture of outer bellows			
	3.	2.1	Outline and specification of outer bellows13			
	3.	2.2	Inspection during manufacturing of outer bellows			
	3.3	Ma	nufacture of inner bellows15			
	3.	3.1	Outline and specification of inner bellows15			
	3.	3.2	Inspection during manufacturing of inner bellows			
	3.4	Me	asurement of levelness of compornents in the assembly of accumulator33			
4.	In	stall	ation of accumulator with keeping levelness obtained through manufacturing 49			
	4.1 On-site installation procedure					
	4.2	Ins	tallation of accumulator with keeping levelness obtained through manufacturing. 53			
5.	Be	ehav	ior of accumulator at cryogenic commissioning58			
6.	Pe	erfor	mance of cryogenic hydrogen system at operation61			
7.	Su	ımm	ary64			
Ac	kno	wleg	gments64			
Re	efere	ences				
Ap	open	ndix .	A. Comparison of specification etc. of accumulator first to third67			
Ap	open	dix 1	B. Handling procedure of spent accumulator second71			

表リスト

Table 3.1	ベローズブロック5台の芯ずれ量の測定結果	23
Table 3.2	ベローズブロック 5 台のバネ乗数	28
Table 3.3	内ベローズ製作完成時の水平度測定結果(試験用治具による吊り状態)	29
Table 3.4	内ベローズ製作完成時の水平度測定結果(定盤置き状態)	30
Table 3.5	内ベローズ製作完成時の変位測定結果(試験用治具による吊り状態、定盤床置き状態)
		31
Table 3.6	内ベローズへの容器フランジ及び外ベローズ用フランジ取付け時の水平度測定結果	
	(サポート吊下げ状態)	35
Table 3.7	内ベローズへの容器フランジ及び外ベローズ用フランジ取付け時の変位測定結果	
	(サポート吊下げ状態)	37
Table 3.8	内ベローズと外ベローズの組立後の水平度測定結果	39
Table 3.9	内ベローズと外ベローズの組立後の変位測定結果	41
Table 3.10)アキュムレータ完成時の水平度測定	44
Table 3.11	アキュムレータ完成時の変位測定結果	47
Table 4.1	セイフティボックス内据付け後の水平度測定	54
Table 4.2	セイフティボックス内据付け後の変位測定結果	55

図リスト

Fig.1.1	低温水素システムの概要	.1
Fig.1.2	MLF 鳥瞰図に対する低温水素システムの配置	.2
Fig.1.3	陽子ビーム ON/OFF 時のアキュムレータ及びヒーターの圧力制御	.3
Fig.2.1	アキュムレータ1号機の交換、解体後の発泡試験	.5
Fig.2.2	アキュムレータ1号機と2号機の概略構造図	.6
Fig.2.3	アキュムレータの交換作業要領(1号機から2号機へ交換)	.7
Fig.2.4	アキュムレータ交換工事(左:セイフティボックスのトップフランジ取外し、	
	右:専用架台に設置)	.7
Fig.2.5	アキュムレータ交換工事(専用架台で1号機から2号機へ)	.8
Fig.2.6	内ベローズ耐久試験用プログラム設定画面	.9
Fig.2.7	内ベローズ耐久試験 14,904 回繰り返し試験後の破損	.9
Fig.2.8	2号機と同構造のアキュムレータの設置シミュレーション	11
Fig.2.9	アキュムレータ 3 号機の概略構造	11
Fig.2.10	分割構造のアキュムレータ3号機の設置シミュレーション	12
Fig.3.1	アキュムレータ3号機の組立・製作の流れ	14
Fig.3.2	外ベローズの概略構造図	15
Fig.3.3	内ベローズの概略構造図	16
Fig.3.4	マイクロメータによるベローズの芯ずれ測定	19

Fig.3.5	予備ベローズのマイクロメータによる測定例	20
Fig.3.6	予備ベローズのマイクロメータによる測定例の正弦曲線近似	20
Fig.3.7	予備ベローズの測定結果と正弦曲線近似の差(表面の凹凸)	21
Fig.3.8	振動センサーによるベローズの芯ずれ測定	22
Fig.3.9	ベローズブロック 5 台の下部プレートに対する上部プレートの変位	
	(原子力機構及びベローズメーカーの測定結果の比較)	24
Fig.3.10	溶接ビードの概要図	25
Fig.3.11	レプリカによる溶接ビードの確認方法	26
Fig.3.12	芯ずれに基づくベローズ5ブロックの組立時の位相調整	27
Fig.3.13	ベローズ 5 ブロックの組立時の高さ方向の調整	27
Fig.3.14	水平度測定用の水準器(TESA 製 Clinobevel 1-USB)	32
Fig.3.15	内ベローズ製作完成時の変位測定結果(試験用治具による吊り状態)	32
Fig.3.16	内ベローズ製作完成時の変位測定結果(定盤床置き状態)	33
Fig.3.17	内ベローズへの容器フランジ及び外ベローズ用フランジ取付け時の	
	水平度測定状況	34
Fig.3.18	内ベローズへの容器フランジ及び外ベローズ用フランジ取付け時の変位測定結果	
	(サポート吊下げ状態)	38
Fig.3.19	内ベローズと外ベローズ組み立て時の水平度測定状況	42
Fig.3.20	内ベローズと外ベローズ組み立て時の変位測定結果	42
Fig.3.21	アキュムレータ完成時の水平度測定状況	48
Fig.3.22	アキュムレータ完成時の変位測定結果	48
Fig.4.1	アキュムレータの交換作業要領(2号機から3号機へ交換)	49
Fig.4.2	セイフティボックス(真空容器)天井の梁	50
Fig.4.3	アキュムレータ2号機の取出し手順	51
Fig.4.4	アキュムレータ2号機の取出しの様子	51
Fig.4.5	アキュムレータ3号機の据付け手順	52
Fig.4.6	アキュムレータ3号機の内ベローズ部の搬入状況	52
Fig.4.7	セイフティボックス内取付け時の動作確認の状況(セイフティボックス上部	
	レーザーレベル計窓にて測定)	53
Fig.4.8	セイフティボックス内取付け時の動作確認結果	56
Fig.4.9	アキュムレータのレーザーレベル計による動作確認結果	57
Fig.5.1	低温試運転(クールダウン、定格運転、ウォームアップ)	59
Fig.5.2	アキュムレータ2号機のレーザーレベル計による動作確認結果(水素充圧時)	60
Fig.5.3	アキュムレータ3号機のレーザーレベル計による動作確認結果(水素充圧時)	60
Fig.6.1	932 kW と 524 kW のビーム入射時の水素循環系内状態変化	62
Fig.6.2	ビーム入射時における水素循環系内圧力変化	63
Fig.6.3	ビーム入射時におけるアキュムレータレベル変化	63

1. 緒 言

大強度陽子加速器施設(J-PARC)の物質・生命科学実験施設(以下、MLFと呼ぶ)の低温水素 システムは、1 MWの陽子ビーム(25 Hz)が水銀ターゲットに入射した際の核破砕反応で発生す る高速中性子を、中性子利用実験に使用する冷中性子に冷却(減速)するための冷凍システムで、 液体水素循環システムとヘリウム冷凍機の2元式冷凍システムである(Fig.1.1)^{1),2),3),4),5)}。MLF鳥 瞰図に対する低温水素システムの配置をFig.1.2に示す。

液体水素循環システムでは、強制循環冷却方式によってパラ水素濃度99%以上の高圧(1.5 MPa) の液体水素(20 K以下)を3基のモデレータに供給する。陽子ビーム入射・停止時には、モデレー タでの核発熱によって、約3.8 kWの熱負荷変動が液体水素循環システムに印加される。その温度 変化に伴うわずかな密度変動によって、MPaオーダーの大きな圧力変動が低温の液体水素循環シ ステムに発生する。このようなMPaオーダーの圧力変動を数+kPaオーダーまで低減させるため に、ヒーター(最大7 kW)による熱補償と自発的容積可変機能を有するアキュムレータによる圧 力変動抑制機構を液体水素循環システムに導入した^{6,7}。また、核発熱によって水素の温度が上昇 し、その密度が変化すると中性子の減速効果が低下するので、平均温度上昇を3 K以下となること を設計条件とした。この条件を満足するように、液体水素循環システムは強制循環冷却によって 水素の循環流量を190 g/sと決定し、2台の水素循環ポンプを並列運転している⁸。モデレータを 含むこの液体水素循環システムは、大型のヘリウム冷凍機(6.5 kW at 15.5 K)によって冷却され る。



Fig.1.1 低温水素システムの概要



Fig.1.2 MLF 鳥瞰図に対する低温水素システムの配置

アキュムレータは、一般に自動車などでは油圧システムの「圧力保持」、空調冷凍設備では圧縮 機への液の混入を防ぐ「液分離器」として使用されているが、低温水素システムのアキュムレー タは、核破砕中性子源で特有の陽子ビームの受入及び停止に伴う熱負荷に対して、ベローズの伸 縮により、サージタンクのような「脈動や衝撃の緩衝」の役割を果たす。国内のヘリウム・水素 冷媒の大型冷凍機でアキュムレータを導入している例は、他にはない。

Fig.1.3 に本低温水素システムのアキュムレータの動作原理を示す。水銀ターゲットに陽子ビ ームが入射して、核破砕反応で中性子が発生し、モデレータで水素原子との衝突により冷中性子 に減速する。このとき、モデレータ内水素及び容器の核発熱で生じた熱負荷分はヒーター出力を 下げて補償し、モデレータからヒーターまでの間の温度上昇分の圧力上昇(体積膨張分)はアキ ュムレータで吸収するしくみである。アキュムレータでは、内包する溶接ベローズ(以下、内ベ ローズと呼ぶ)に20 K領域でも凝縮しないヘリウムガス(圧縮性)を一定圧入れ、そのベローズ の自発的な容積変動により圧力変動を吸収する。本液体水素循環システムの特性上、1 MW 陽子 ビームの入射・停止時に必要な容積変動量は 2.1 L である。内ベローズと成形ベローズ(以下、 外ベローズと呼ぶ)をシャフトによって連結した構造とし、ベローズの変位量を外ベローズの頂 点の天板の変位として、レーザー変位計により計測する。ベローズの詳細構造は後述するが、内 ベローズは1ブロックが 17 山の溶接ベローズを 5 ブロック連結したもので、外ベローズは1ブ ロックが 13 山の成形ベローズを内ベローズ側の変位量と同等の変位になるように 12~13 ブ ロック連結したものである。



Fig.1.3 陽子ビーム ON/OFF 時のアキュムレータ及びヒーターの圧力制御

停電などによるヘリウムまたは水素側の圧力喪失時に瞬時に過圧保護することは困難と考え、 リリーフバルブ、安全弁、破裂板で圧力逃し対策を行うとともに、設計方針として内ベローズの 耐圧性能をアキュムレータの設計圧力と同等の2 MPaとした。J-PARCより先行して稼働した米 国オークリッジ国立研究所の核破砕中性子源SNS⁹でも、液体水素循環システムにアキュムレー タを備えており、その設計圧力は1.9 MPa である。ただし、ベローズ自体の耐圧性は低く、過圧 保護のリリーフバルブでベローズの損傷対策を行っている。

2010年4月、アキュムレータ1号機において、容積可変機能部の内ベローズで不具合が生じた 際、応急的な対策を講じた2号機を製作して交換した。不具合の原因は、これまで大口径かつ耐 圧性を持つ溶接ベローズ製作の実績がなかったことから、ベローズプレート同士を押し付けなが ら溶接する際の押し付け力が不足したための溶接不良によるものであった。2 号機では実績のあ る板厚、口径で製作したため、当初の設計圧力2MPaに対してベローズの許容差圧が0.94MPa と低くなり、低温水素システムのインターロックで運転停止に向かう場合、水素系の水素を放出 するためにヘリウム側との許容差圧を超えてベローズが破損する可能性があった。そこで、ヘリ ウム側の圧力を制御するための自動弁を追加して、水素放出時に許容差圧を超えないようにヘリ ウム側圧力を同時に制御したり、差圧が 0.4 MPa 以上となると注意報が発報する対策を施した。 しかし、陽子ビームの出力が上がっていくに伴い、陽子ビーム ON/OFF 時のアキュムレータにか かる変動幅が上昇してベローズにかかる負荷も増加してくるため、設計方針に基づいて、ベロー ズ内外許容差圧が2MPa、2MPaにおける繰り返し寿命が1万回以上の耐圧性能を有する溶接べ ローズを開発し、高出力化に対応できるアキュムレータ3号機と交換する必要があった。そこで、 内ベローズの試作、耐久試験を通した溶接性の改善を行い、アキュムレータ製作及び据付け時の 水平度・垂直度管理を行って、3号機を製作して2号機と交換を行った。本報告書では、3号機開 発の課題、解決に向けた製作・検査・据付け方法の確立、3号機完成結果について記述する。

2. アキュムレータ開発の経緯と課題

2.1 アキュムレータ1号機の不具合

2010年2月、ビーム利用運転に向けた準備作業中、水素循環系統への水素充圧の前に真空置換 を行ったところ、真空度が既定値に到達しない現象を生じた。水素系統側を真空引きしても負圧 が一定に維持できず、最終的にヘリウム系統側と均圧化したため、アキュムレータ内部のベロー ズ構造の水素側とヘリウム側の境界壁に漏えい経路があることが予想された。外観調査を行った 結果、漏えい部位はアキュムレータ内のベローズを含む水素側とヘリウム側の境界壁部位である 可能性が最も高く、さらに詳細な検討を行うためには、アキュムレータを真空容器外部に取り出 し、内部を分解点検する必要があった。アキュムレータを取り出し、新しく製作するには半年以 上の時間がかかる。しかし、J-PARC では既に 6 月までの期間を中性子利用実験に割り当ててい たため、運転停止期間を最小限に留める方法を検討した。このときビーム出力が 100 kW 程度と 低かったので、アキュムレータを機能させずにヒーター制御のみの圧力変動制御による運転が可 能と判断し、アキュムレータをべイパスする改造を行った。この改造は、低温水素システムの高 圧ガス製造施設等変更許可申請及び完成検査の手続きも含めて実施した。この結果、計画外の運 転停止を 2010年3月までに留め、4 月から6 月の期間は 120 kW のビーム出力の利用運転がで きるようにした。また、同時にアキュムレータ2 号機の製作も開始した。

アキュムレータ1号機は夏季保守期間に取外し、発泡試験により内ベローズの外周溶接で発泡 及び亀裂を確認した(Fig.2.1)。具体的には、ベローズの外側と内側、すなわち、水素側とヘリウ ム側の境界が破れて漏えいを生じたことを結論づけた。さらに、破損部の断面観察を行った結果、 環状のベローズプレート(板)の外側と内側を交互に溶接してベローズ部分を製作するが、その ベローズプレート同士を溶接した溶接ビードの寸法が製作基準を満足しない部分を確認し、不具 合の原因は内ベローズの溶接不良と特定した。



Fig.2.1 アキュムレータ1号機の交換、解体後の発泡試験

2.2 アキュムレータ2号機の製作

2010年の秋から予定していた 120 kW 以上の陽子ビーム出力での運転に対応するために、アキュムレータ 2 号機の製作を開始した。アキュムレータ 1 号機では、内ベローズの口径が φ 520 mm で耐圧性能 2 MPa とする仕様を満足するために、ベローズのプレートを 0.8 mm と厚くしたが、ベローメーカーの製作実績がない仕様であったために、溶接が不十分となった可能性を原因として推察した。そこで、内ベローズの仕様は、ベローメーカーで十分実績のある 0.4 mm 肉厚プレートの二重化、応力の負荷を抑えるために必要最小限の容積とした口径 φ 350 mm に変更した。 Fig.2.2 にアキュムレータ 1 号機とアキュムレータ 2 号機の概略構造図を示す。

この設計変更により、内ベローズの耐圧性能は 2 MPa から 0.9 MPa まで下がることになった ため、ベローズ内外の圧力差として 0.9 MPa の許容差圧以上の差圧が発生しないように、制御ソ フトウエアを変更した。特に、計画停止や異常時の降圧操作及び降圧のシーケンスは、内ベロー ズの内外の水素及びヘリウム圧力を交互に、かつ、段階的に降圧するように改良した。

アキュムレータ2号機は2010年9月に完成し、アキュムレータ1号機と交換した。その後、アキ ュムレータ1号機の不具合の原因調査をメーカーと共同で実施し、当初設計通りの耐圧性能2 MPa の内ベローズを有したアキュムレータ3号機製作のための調査、検討を行った。



Fig.2.2 アキュムレータ1号機と2号機の概略構造図

2.3 アキュムレータの据付け方法

Fig.2.3 にアキュムレータ1号機と2号機の交換手順の概要を示す。アキュムレータ2号機の 交換設置のために、まずアキュムレータ1号機の取外しを行った。アキュムレータ1号機の取外 しは、セイフティボックス(真空槽)のトップフランジを外して、水素循環系統をセイフティボ ックス内から取り出した後、水素循環系統からアキュムレータを取り外した。水素循環系統の機 器は、熱侵入を抑えるためにセイフティボックスの真空槽に囲われ、基本的に天井から吊下げら れた構造となっている。最初に製作した際も、トップフランジ側の水素循環系統機器をセイフテ ィボックスの円筒真空容器に挿入するように据付けした。セイフティボックス横には点検口とし てマンホールがあるが、アキュムレータ1号機の寸法上、このマンホールからの取出しはできな かった。したがって、排気系、分析系、ヘリウム冷凍機との往復配管、モデレータ配管、その他ケ ーブル類等を切り離し、アキュムレータを含めた水素循環系統をトップフランジごと持ち上げて、 MLF 中2階の低温水素設備室から MLF3 階の大型機器取扱室(Fig.1.2参照)の専用架台に置い た(Fig.2.4)。その後、水素循環系統から配管を切断して、アキュムレータ1号機を取り外した。

アキュムレータ2号機は、大型機器取扱室の専用架台上で、取り外したアキュムレータ1号機 の位置に接続し(Fig.2.5)、水素循環系統を含めてセイフティボックスのトップフランジを復旧し た。復旧後、アキュムレータ2号機の動作試験、各配管等の気密検査、ヘリウムリーク検査を行 い、異常がないことを確認した後、試運転を行った。アキュムレータの交換工事は、冷凍保安規 則適用の高圧ガス施設である本低温水素システムの高圧ガス製造施設等変更許可申請及び完成検 査の手続きも含めて実施した。

この工事は、前述の通り、セイフティボックスのトップフランジごと開放する大掛かりなもの であったため、約 1.5 ヶ月の期間を要した。



Fig.2.3 アキュムレータの交換作業要領(1号機から2号機へ交換)



Fig.2.4 アキュムレータ交換工事(左:セイフティボックスのトップフランジ取外し、 右:専用架台に設置)



Fig.2.5 アキュムレータ交換工事(専用架台で1号機から2号機へ)

2.4 アキュムレータ3号機の開発と課題

前述したように、アキュムレータ2号機の内ベローズの耐圧性能は0.9 MPa と本来備えるべき 値より低下した。通常運転で内ベローズに発生する差圧は0.5 MPa 以下であるが、破裂板の作動、 計装空気断による放出弁からの水素放出、停電などの異常事象が発生した場合や、オペレータに よるヒューマンエラーがあった場合には、許容差圧以上の1.5 MPa~2.0 MPa の差圧がつく可能 性がある。また、1 MW 陽子ビームによる利用運転を行うためには、設計許容差圧 2 MPa のアキ ュムレータ3号機が必要不可欠である。2013年は、加速器のリニアックを150 kW から400 kW にビーム出力増強に必要な機器を増設するために、7 月から12 月までが保守期間であったので、 この期間を利用してアキュムレータ3号機を導入することを計画した。

アキュムレータ3号機開発における課題は以下の4項目である。

- (1) 内ベローズの耐圧性能 2 MPa
- (2) 内ベローズの設計寿命1万回(2 MPa 時)
- (3) 内ベローズ、アキュムレータの動作の再現性確保
- (4) アキュムレータの据付け工程の短縮化
- (1) 内ベローズの耐圧性能

内ベローズの耐圧性能を当初の設計圧力である 2 MPa とするために、ベローズプレートの 板厚を 0.8 mm の肉厚にすることが必要である。アキュムレータ 1 号機の内ベローズについて の溶接溶け込み不足は、この肉厚に対する溶接機の押し付け力が不足して、規定量の溶け込み ができなかったことが原因であった。このため、ベローズプレートの幅を広げたり、溶接板の 押え治具形状を幅広にして押え易いように工夫したりすることで、ベローメーカーが溶接要領 を見直し、0.8 mm 厚の溶接ベローズ製作技法を確立して解決の目途を得た。 (2) 内ベローズの設計寿命

アキュムレータのベローズにかかる内外圧力差を考慮した設計寿命である差圧 2 MPa 時に 1 万回以上という仕様を満足することを確認するため、上記した溶接ベローズ製作手法を用い て内ベローズ 1 ブロック分を試作し、その耐久試験を日本原子力研究開発機構(原子力機構) で実施した。

試作内ベローズを水で満たし、窒素ガスボンベを接続した配管を組み立てて、ゲージ圧力で 0から2MPaのガス圧力を内ベローズに繰り返し与えた。Fig.2.6に耐久試験のために作成し たプログラムの設定画面を示す。約7秒で0から2MPaまで昇圧し、約10秒保持した後、約 5秒で0MPaまで降圧して3秒ホールドすることを1回として、100回ごとに外観や圧力降 下がないかを確認した。その結果、14,904回のホールド時に圧力降下があり、水漏れを確認し た(Fig.2.7)。これにより、設計寿命1万回に対して約1.5倍の裕度があることが分かった。



Fig.2.6 内ベローズ耐久試験用プログラム設定画面



Fig.2.7 内ベローズ耐久試験 14,904 回繰り返し試験後の破損

(3) アキュムレータの動作の再現性確保の重要性

アキュムレータにおいて、水素循環系内の圧力変動に対してベローズが自発的な容積変動、 すなわち変位を生じる際、ひっかかりがなく、スムーズな動き、ヒステリシスのない再現性の ある動作を確保することが寿命に大きな影響を及ぼすと考えた。すなわち、いかに耐圧性の高 い内ベローズを製作し、内ベローズの1ブロックの耐久試験が満足しても、5ブロックからな る内ベローズの組立製作、外ベローズを含めた全体アキュムレータの組立製作において、歪み や曲りなどによってベローズが擦れたり、ひっかかりがあると、アキュムレータの寿命を大き く低下させる要因になりうる。そこで、アキュムレータ3号機の製作では、内ベローズの製作 から MLF 現地据付けに至るまで、水平度管理、スムーズな動作確認に細心の注意を払い、各 製作工程でベローズの動作時において水平度 0.1 °以内を目標として管理、確認し、ヒステリ シスが抑えられていることを確認した。詳細については第3章、第4章で記す。

(4) アキュムレータの据付け工程の短縮化

2.3 節で述べたように、アキュムレータ 1 号機と 2 号機の交換には約 1.5 ヶ月を要した。 MLF 利用運転中に万が一アキュムレータに不具合が生じ、予備機があったとしても、本工事 によって 1.5 ヶ月施設が停止することは国内外のユーザーを持つ施設として許容できない。そ こで、3 号機の据付けでは約 3 週間で交換工事を完了することを目標に、工程の短縮化を検討 した。まず、初回の交換工事ではセイフティボックスのトップフランジごと開放する大掛かり な工事であったので、セイフティボックスの側面にあるマンホール(直径約 710 mm)を利用 して、そこからアキュムレータの出し入れが可能か 3D-CAD ソフト Pro/ENGNEER を用いて シミュレーションを行った。その結果、セイフティボックスの中には水素循環系統の配管が複 雑に設置されているが、2 号機と同じ設計、寸法のアキュムレータ完成品を搬入した場合、上 下左右前後、さらに回転させながら、配管等を避けて目的の設置位置まで移動できる可能性を 見出した(Fig.2.8)。

しかし、実際は 500 kg 以上の重さのアキュムレータを、一人しか入れないほどのセイフティボックス内の狭いスペース、かつ、限られた吊り具や可動領域の中では自由に取回すことはかなり困難である。干渉する配管や熱交換器などを切断するという案もあったが、最終的には、 Fig.2.9 のようにアキュムレータの外ベローズ側と内ベローズ側を分割する構造を採用した。 分割部分はフランジ構造とし、メタル O リングによるシールによって、水素及びヘリウム循環系統の許容リーク量である 10⁻⁹ Pa・m³/s 以下を満足する構造とした。この分割構造にすることで、マンホールからセイフティボックスへの出し入れが現実的に可能であることを 3D-CAD によるシミュレーションで確認した(Fig.2.10)。



Fig.2.8 2号機と同構造のアキュムレータの設置シミュレーション



Fig.2.9 アキュムレータ3号機の概略構造



Fig.2.10 分割構造のアキュムレータ3号機の設置シミュレーション

3. アキュムレータの製作における改良

アキュムレータの長寿命性を確保するために、アキュムレータのベローズについて、製作・据付け時に歪み、曲りがなく、壁面との擦れを抑えて真っ直ぐな動作が必要である。そこで、3号機製作の際には、各要素単体の製作時に水平・垂直度を管理するとともに、組立工程においても同様に水平・垂直度を管理し、随時動作確認を行って、アキュムレータの性能を満足するように組立、製作を行った。1号機と3号機の仕様の比較を付録Aに示す。

3.1 アキュムレータ3号機の組立・製作の流れ

Fig.3.1 にアキュムレータ 3 号機の組立・製作の流れを示す。アキュムレータの製作には 3 社 (①外ベローズメーカー、②内ベローズメーカー、③外ベローズ、内ベローズ、外筒を合わせた 組立メーカー)が関わった。3 社による製作は独立に行われるが、アキュムレータ完成品の性能を 確保するために、全体工程を通じて求める仕様を満足できるように継続した製作管理を行った。

3.2 外ベローズの製作

3.2.1 外ベローズの概要及び仕様

外ベローズは、Fig.3.2 のように、1 ブロック 13 山の成形ベローズを、ベローズ間にスペーサ ー用のスリーブを挟んで連結して、両端に端管を接続したものである。当初成形ベローズの連結 個数をアキュムレータ 2 号機と同様の 12 個としたが、内ベローズと合わせたバネ定数、内ベロー ズの伸縮量などを考慮して 13 個とした。また、アキュムレータ 3 号機は外ベローズで分割できる ようにするため、内ベローズ側端管の終端をフランジ構造とした。

外ベローズの仕様概要を以下に示す。

- (1)型式: 成形ベローズ(13連結)
- (2) 流体: 内側:ヘリウムガス 外側:真空(運転時)
- (3) 材 質: SUS316L 又はSUS304L
- (4) 設計圧力: 内圧: -0.1013~2.0 MPa 外圧: -0.1013~0.1 MPa
- (5) 設計温度: 15 K~313 K
- (6) ベローズ径: 外径:80 mm 内径:59 mm
- (7) 設計最大差圧: 内圧: 2.1013 MPa 以上 外圧: -0.2013 MPa 以上
- (8) ベローズ伸縮量:±36.5 mm
- (9) 全 長: 製作時 1322 mm (短管含む)、アキュムレータ組立時 1270 mm
- (10)繰り返し寿命: 100 万回以上(運用圧力 1.6 MPa 時、伸縮量±36.5 mm 時)
- (11) バネ定数:約 189 N/mm(単品時)、約 15.8 N/mm(連結時)





Fig.3.2 外ベローズの概略構造図

3.2.2 外ベローズの製作時検査

試験検査において、外観検査、寸法検査、溶接検査、気密検査、耐圧検査、ヘリウムリーク検査 を実施し、異常がないこと、規定値以内であることを確認した。加えて、動作試験を専用の治具 を用いて行い、治具のネジ機構で縮む方向、0.4 MPa 程度の加圧で伸びの方向に伸縮させ、各ベ ローズの変形量及びたわみの確認も合わせ、ひっかかりがなくスムーズな動作を確認した。垂直 度については、フランジ部のパイプ内径を形状測定器により事前に計測した結果、123.8 mm 高 さに対して 0.118 mm のずれがあり、角度に換算すると 89.95 °で、目標の 0.1 °以内であるこ とを確認した。

3.3 内ベローズの製作

3.3.1 内ベローズの概要及び仕様

内ベローズの構造を Fig.3.3 に示す。内ベローズには、①17 山の溶接ベローズ単体を5 連結し た可変容積部(可変容積:6L以上、変位量 73~83 mm の範囲内)と、その許容変位量以上の変 位させないための②下部ストッパー及び③上部ストッパーがある。下部ストッパーは④下部ベロ ーズフランジに固定され、上部ストッパーは⑤上部ベローズフランジに固定されており、内側の ヘリウムと外側の水素領域が区画されている。この下部ベローズフランジは、外ベローズと連結 するための⑥シャフト(心棒)と固定されている。さらに、上部ベローズフランジには、シャフ トのガイド管の役割を果たす⑦ヘリウム配管が接続している。

内ベローズの仕様を以下に示す。



Fig.3.3 内ベローズの概略構造図

①5連結可変容積用溶接ベローズ

- (1)型式: 溶接ベローズ(5ブロック連結)
- (2) 流体: 内側:ヘリウムガス
 - 外側:水素
- (3) 材 質: SUS316L
- (4) 設計圧力: 2+0.1013 MPa
- (5) 設計温度: 15 K~313 K
- (6) ベローズ平均径(外径/内径): 330 mm (353 mm/307 mm)
- (7) ベローズプレート(板)厚: 0.8 mm×1 枚
- (8) 設計最大差圧(ベローズ内外): 2.1013 MPa 以上
- (9) ベローズの設計寿命:

5 連結状態での最大駆動差圧 0.08 MPa 条件下における 40 mm の繰り返し伸縮した場合の寿命は 50 万回以上。(設計圧力 2.1 MPa 条件下で 1 ブロックの寿命は 1 万回以上)

- (10) フルストローク: 73 mm 許容公差+10 mm
- (11) フルストローク時の最大駆動差圧: 0.08 MPa 以下
- (12) ベローズの内外差圧条件を満足する圧力設計を実施。
- (13) 溶接ベローズを連結する際に伸縮をサポートするためのベローズスペーサー
 (SUS316L 相当品)を設置し、5 連結したベローズの動作は、ひっかかりがなく、スム ーズな動作。

②下部ストッパー

- (1) 材 質: SUS316L
- (2) 設計温度: 15 K~313 K
- (3) 主要寸法外径: φ 400 mm
 - 高さ:585 mm
- (4) 溶接ベローズの伸び方向を制限する、最外側の円筒形ホルダー。溶接ベローズの下部フ ランジの外側に設置し、このフランジの中心には心棒を固定。

③上部ストッパー

- (1) 材 質: SUS316L
- (2) 設計温度: 15 K~313 K
- (3) 主要寸法: 外径:約φ260 mm
 高さ:412 mm (ストロークに関わる高さ449 mm)
- (4) 溶接ベローズの縮み方向を制限する、ベローズ内部に設ける円筒形ホルダー。溶接ベロ ーズの上部フランジに固定し、ベロー間に設置するスペーサーをサポート。

④下部ベローズフランジ

- (1) 流 体: 内側:ヘリウム 外側:水素 (運転時)
- (2) 材 質: SUS316L
- (3) 設計圧力: 2+0.1013 MPa
- (4) 設計温度: 15 K~313 K
- (5) 主要寸法: 外径: φ 400 mm 板厚: 40 mm
- (6) 溶接ベローズの底板となる。また、下部ストッパー、心棒が設置される。製作時には、この下部ベローズフランジは製作時の基準面となることから、その水平度を管理するとともに、シャフト(心棒)(⑥)との接続時には、その垂直度も測定して、十分管理。この精度が後々のアキュムレータ製作時における外ベローズの接続時やスムーズな動作に大きく影響するので十分に注意して施工。

⑤上部ベローズフランジ

- (1) 流体: 内側:ヘリウム 外側:水素 (運転時)
- (2) 材 質: SUS316L
- (3) 設計圧力: 2+0.1013 MPa
- (4) 設計温度: 15 K~313 K
- (5) 主要寸法: 外径:約 \$\phi\$ 350 mm 板厚: 32 mm (端部) 32+33 mm (中央部)
- (6) 溶接ベローズの上蓋となる。また、上部ストッパーが設置される。
- (7) 内ベローズ製作過程の初期段階において、上部ベローズフランジ(⑤)も5連結溶接ベローズ(①)を溶接。この上部ベローズフランジが、この内ベローズ製作における水平、垂直の基準面となるので十分に管理。さらに上部ベローズフランジにヘリウム配管(⑦)が施工されるが、スムーズなベローズの動作を実現するために、ヘリウム配管溶接前後での垂直度を管理し、記録。

⑥シャフト(心棒)

- (1)型式: パイプ
- (2) 材 質: SUS316L
- (3) 設計温度: 15 K~313 K
- (4) 主要寸法: 外径 64 mm×内径 39 mm + 外径 48.6 mm×t 3.7 mm
- (5) 外ベローズ側のシャフト(心棒)と取り合い部に設置するためのアダプター(SUS316L、 M36 ネジ深さ28)を製作し、取付け。

⑦ヘリウム配管

- (1)型式: パイプ
- (2) 材 質: SUS316L
- (3) 設計温度: 15 K~313 K
- (4) 主要寸法: 外径: ϕ 48.6 mm 板厚: 3.7 mm

設計製作指針を以下のようにした。

- (1) ばね定数: 水素循環系の許容差圧を考慮し、1 MW ビーム入射停止時におけるアキュムレ ータ変動圧力が 70 kPa 以下となるばね定数のベローズを選定。
- (2) ベローズ可変容積: 6L以上
- (3) ベローズ最大ストローク: 73 mm~83 mm 以内(負荷抑制のため 80 mm~90 mm の伸縮 能を有するベローズをストッパーで抑える。)
- (4) 差圧の増加時と減少時での変位のヒステリシスはアキュムレータ 1 号機と同等となるよう に考慮する。その理由は、大きなヒステリシスの存在は、各ベローズが不均一な伸縮をして いることを意味し、一部の溶接部において、許容変位以上の変形が発生する可能性もある。 このような不均一の変位時における寿命評価は極めて困難であるため、ヒステリシスは1号 機と同程度。
- (5) ベローズの動作に対し、ひっかかりがなく、スムーズな動きができることを動作試験で確認。
- (6) 内ベローズの動作時の傾きは心棒に負荷がかかり、ベローズの曲がりの原因となるため、設計以上の傾きがないこと。
- (7) ベローズ 5 ブロックの組立て・溶接時には、アキュムレータとして均一な伸縮量を得るために、組み立て時において、各ブロックのバネ定数及び自重測定結果を評価し、その順番で5 連結の可変容積用溶接ベローズを製作。
- (8) 心棒はフランジに対して垂直に設置。

3.3.2 内ベローズの製作時検査

3.3.2.1 ベローズブロック単体の製作と検査

(1) ベローズブロック単体の芯ずれ確認(マイクロメータによる予備測定)

ベローズブロックは、リング状の2枚のベローズの内側を円周方向に溶接した1組のベロー ズプレートの上に、もう1組重ねて間の2枚のベローズプレートの外側を円周方向に溶接し、 これを繰り返して34枚のベローズプレートを17段の蛇腹にして、上下を金具で溶接し1ブ ロックを構成している。

アキュムレータの完成品を考えた場合、ベローズの歪みや曲りによる擦れやひっかかりが全体の寿命に影響を及ぼすため、まず始めにベローズブロック単体について芯ずれの確認を行った。Fig.3.4 のように、ベローズ 1 ブロックを回転台に乗せて、ハイトゲージにマイクロメータを設置し、計測することによって芯ずれを評価した。おおよその手順を以下に示す。



Fig.3.4 マイクロメータによるベローズの芯ずれ測定

- ベローズ1ブロックを回転台に乗せ、下部プレートを基準にするため、下部プレートの 芯出しを行う。(回転台を回転させながらマイクロメータが振れない位置を探して回転台 に固定する。)
- ② その下部プレートの周方向変位を 10 度ごとにマイクロメータの読みを記録する。
- ③ 一段ずつの溶接ビードの周方向変位を10度ごとにマイクロメータの読みを記録する。
- ④ Fig.3.5 に予備のベローズ1ブロックを測定した例を示す。下部プレートを基準に芯出ししたので、下部プレート開先部は変位があまりなく、ほぼ直線で、わずかな差異は機械加工の精度によると思われる。上部プレート開先部は同じ機械加工であるが芯がずれているため正弦曲線を示している。つまり、

(変位) = C × sin(θ + A) + B

で表すことができる。ここで A は位相のずれ $(sin(\theta + A)=1 \ base \ b$

例えば、Fig.3.6 は Fig.3.5 の結果を正弦曲線で近似したもので、下部プレートを基準に 最も離れた上部プレートの開先部の近似は、

(変位) = $0.43 \times \sin(\theta - 35.5) + 0.104$

で、上部プレート開先部は下部プレート開先部より 0.104 mm 半径が大きく、125.5 ° の方向に 0.43 mm 芯がずれていることになる。



ベローズ回転角度

Fig.3.5 予備ベローズのマイクロメータによる測定例



Fig.3.6 予備ベローズのマイクロメータによる測定例の正弦曲線近似

① ここで、回転角度に対して実際の測定値から正弦曲線近似値を差し引く、すなわち、測定結果から理想的な平均的な円からの差を求めると、真円に対する実際の凹凸を傾向として求めることができる(Fig.3.7)。下部プレート、上部プレートとも開先部は機械加工のままなので±0.02 mm 以内に収まっているが、溶接部は±0.1 mm 前後の凹凸があり、0.3 mm を超える凹部が一部あって顕著に凹んでいるところは周溶接のオーバーラップ部分と一致する。



Fig.3.7 予備ベローズの測定結果と正弦曲線近似の差(表面の凹凸)

(2) ベローズブロック単体の芯ずれ確認(振動センサーによる応用測定)

マイクロメータは測定部に接触させて計測するため溶接ビードに傷をつけてしまう可能性 がある。また、マイクロメータでの測定は回転台を 10 度ごとに止めて記録するため時間がか かることと、回転台を止めたときの反動で誤差が生じる可能性があることも課題であった。そ こで、水素循環ポンプでも使用している振動センサーを用いた測定を行った。この場合、非接 触で測定することができるので、溶接ビードに傷をつけることがなく、さらに、回転台を止め ずに連続的な測定ができる。

ただし、振動センサーを使用する際には、基準となるセンサーの対象物からの距離に対する 電圧変位を校正データとして事前に取得する必要がある。また、マイクロメータと振動センサ ーの両者を使用した結果を比較したところ、一部で差異が生じた。これは、溶接ビードの溶接 個所の凹凸やビードの大きさによる半径方向の距離の変化だけでなく、ベローズプレートの高 さ方向の傾きもあるため、回転台で一周する間に、溶接ビードの頂点がずれてしまうことが原 因であった。そこで、振動センサーによる測定では、測定を開始する基準点0の位置の測定の 他、高さ+0.5 mm、-0.5 mmの3点の測定を行い、同じ回転角度において最小の値を正値とし て選定した。測定の手順を以下に示す。

- ベローズ1ブロックを回転台に乗せ、下部プレートを基準にするため、下部プレートの 芯出しを行う。(回転台を回転させながらマイクロメータが振れない位置を探して回転台 に固定する。)
- ② Fig.3.8 のように振動センサーを取り付けて、基準となるセンサーの対象物からの距離に 対する電圧変位の校正データを作成する。
- ③ 下部プレートの周方向変位を連続的に測定する。
- ④ 一段ずつの溶接ビードの周方向変位を連続的に測定する。このとき、高さ方向の基準の0 点位置、+0.5 mm位置、-0.5 mm位置の3点の周方向変位を測定し、最小の距離を正値 として評価する。
- 5 前述のように、正弦曲線近似を行い、芯ずれの方向、芯ずれの大きさ等を評価する。



Fig.3.8 振動センサーによるベローズの芯ずれ測定

製作が完了したベローズブロック5台分の測定を行った結果をTable 3.1 に示す。ベローズ メーカーが内ベローズを製作する前にノギスを使って測定した結果も併記した。芯ずれ量の最 大値は13%、芯ずれ方向では最大12%の差があるが、回転台と振動センサーを使った測定結 果とノギスを使った測定結果は概ね一致していると考えられる。Fig.3.9 に、両者の結果の下 部プレートに対する上部プレートの変位を示したレーダー線図を示す。変位量とその方向がほ ぼ一致していることが分かる。これらの芯ずれの結果を基に、内ベローズの製作においてベロ ーズ5ブロックを組み立てるために必要な調整を行った。

N'E T'N	原子力機構		ベローズメーカー	
$\sim 1 - 10$.	芯ずれ量 (mm)	芯ずれ方向	芯ずれ量 (mm)	芯ずれ方向
No.1	0.163	304°	0.177	268°
No.2	0.410	352°	0.426	328°
No.3	0.291	338°	0.302	311°
No.4	0.525	328°	0.605	307°
No.5	0.414	278°	0.370	31 7°

Table 3.1 ベローズブロック 5 台の芯ずれ量の測定結果 (ベローズメーカーの測定はノギスを使用)



Fig.3.9 ベローズブロック5台の下部プレートに対する上部プレートの変位 (原子力機構及びベローズメーカーの測定結果の比較)

(3) 溶接ビードの確認

0.8 mm 厚の溶接ベローズの製作技術を確立する過程で、試作ベローズの耐久試験やその破壊試験後の切断サンプルを実測して溶接部が健全なことを確認した。一方で、実際の製品では切断せずに外観から健全性を確認する必要がある。Fig.3.10 はベローズプレート同士の溶接部である溶接ビードの概要図である。ベローズメーカーでは溶接深さの社内基準に対して、溶接ビード幅、飛び出し量の規定量を満足することを以って合格と判断することとし、マイクロメータと測定子を使って溶接部に接触して確認していた。しかしながら、針のような測定子で接触させることで溶接ビードに傷がつく可能性があるため、原子力機構では SEM などで使われているレプリカを採用することを提案した。予備ベローズを使ってその確認方法を確立し、ベローズ5ブロックの製品の検査に適用した。



Fig.3.10 溶接ビードの概要図

レプリカを用いた溶接ビードの確認方法を Fig.3.11 に示す。

- ① レプリカ溶剤を乗せる板(FRP板、100×35×t1(mm))を用意して、レプリカ溶剤を板の中心線上に 3~4回往復させて溶剤を厚みを持たせて乗せる。
- ② ベローズに貼り付ける前に逆さにして、垂れない程度に厚みを持たせる。
- ③ ベローズに貼り付けて、剥がれないようにセロテープ等で押さえ、約5分間保持する。
- ④ 約5分後、レプリカを丁寧に剥がす。強く引っ張ると切れてしまうので注意する。
- ⑤ レプリカカット用治具で垂直にカットする。
- ⑥ 顕微鏡撮影で保存して、画像上で溶接ビードの測定を行う。

ベローズ5ブロックの製品に対して溶接ビードのビード幅、飛び出しを測定した結果、いず れも規定量を満足し、溶接が健全であると結論づけた。



Fig.3.11 レプリカによる溶接ビードの確認方法

3.3.2.2 内ベローズの組立製作と検査

(1) ベローズ5ブロック組立時

前節で求めたベローズの芯ずれに対して、製作時の位相のまま 5 ブロックを組み立てると、 Fig.3.12(a)にまとめたように各ブロックの芯ずれが加算されて一方向に傾き(約3mm)、スペ ーサーとガイドのギャップ 0.4 mm を超え、スペーサーを押さえつけながら傾いて伸縮するこ とになり、ベローズの寿命に影響を及ぼす。そこで、Fig.3.12(b)のようにベローズ No.1、No.3、 No.5 の位相を 180 度変えることで、芯ずれの方向を相殺させて、平均的な位置に収まるよう にした。



Fig.3.12 芯ずれに基づくベローズ5ブロックの組立時の位相調整

また、ベローズブロックの間に設置する4個のスペーサーにも傾きがあり、組み立てた状態 での高さがばらつかないように調整し、Fig.3.13のようにベローズブロックとスペーサーを組 み立てた状態の高さが0.1 mm 以内の差に収まるようにした。



Fig.3.13 ベローズ5ブロックの組立時の高さ方向の調整

さらに、Table 3.2 に示すように、各ベローズブロックのバネ乗数は 277~326 N/mm とば らつきがあったため、各ブロックが均一に伸縮できるように最初の伸縮が始まる最上下段にバ ネ乗数が大きいものを配置した。すなわち、下から、ベローズ No.2 (326.2 N/mm)、No.3 (306.6 N/mm)、No.4 (276.8 N/mm)、No.5 (281.8 N/mm)、No.1 (319.9 N/mm) とした。

ベローズ No.	バネ定数 (N/mm)
No.1	319.9
No.2	326.2
No.3	306.6
No.4	276.8
No.5	281.8

Table 3.2 ベローズブロック5台のバネ乗数

(2) 内ベローズの製作時検査

内ベローズの製作時検査として、外観検査、寸法検査、溶接検査、気密検査、耐圧検査、ヘ リウムリーク検査を仕様通りに実施し、異常がないこと、規定値以内であることを確認した。 水平度測定及び動作確認については次項に記す。

(3) 内ベローズ製作完成時の水平度測定と動作確認

内ベローズが完成した後の水平度測定の結果について、底面を定盤に置いた状態での測定結 果を Table 3.3、試験用治具で吊下げた状態での測定結果を Table 3.4 に示す。使用した水準器 は Fig.3.14 に示した TESA 製 Clinobevel 1-USB で、1/60 °まで測定できる精密な測定器で ある。以降、アキュムレータを MLF で組み立てた時まで同じ測定器を使用した。測定位置は Table 3.3 に示したように、試験用治具の側面 2 点と下部ストッパー上面、下部ストッパー側 面 2 点、底面の 6 点である。動作試験は、底面を定盤に置いた状態と、試験用治具で吊下げた 状態で実施し、ベローズ内部に窒素ガスで段階的に加圧、下部ストッパー上面から各ベローズ ブロックの距離を金尺で測定して加圧及び減圧時の伸び縮みを確認した(Table 3.5)。

水平度測定の結果、最大差は 0.08 ° であり、目標とした 0.1 ° 以内を満足した。また、 Fig.3.15 及び Fig.3.16 のように動作確認では設計通り 80 mm のストロークの伸び縮みを確認 し、ひっかかりのないスムーズな動きとヒステリシスがほとんどない動作を確認した。
			5		2		:									
	底面	270° I	0° 17	270° 1	0° 17	270° I	0° 17	0°								
	2	270° ⊾	$0^\circ~22'$	270°	$0^\circ~22'$	270° ⊾	$0^\circ~22'$	0°								
位置	(4)	270° ⊾	$0^\circ 15'$	270°	0° 11'	270° ⊾	0° 11'	0.07°								
$_{\circ}06$	3	270° ⊾	$1^\circ \ 00'$	270°	$1^\circ ~00'$	270° ⊾	$1^\circ ~00'$	0°	味。)	ШX ЛП						
	\bigcirc	270° ⊾	0° 17'	270°	0° 17'	270° ⊾	$0^\circ \ 19'$	0.03°	るという意	- 試験用浴						
		270° ⊾	$0^\circ \ 19'$	270° L	$0^\circ 20^{\prime}$	270° ⊾	$0^\circ 18'$	0.03°	分傾いてい	V				 		
	底面	°0 ~	$0^\circ 12'$	₀0►	$0^\circ 12'$	₀0▼	$0^\circ 12'$	0°	方向に 11	\bigcirc	0	3				底面
〔位置〕	0	∘0▼	$0^\circ \ 08'$	₀0▼	$0^\circ \ 08'$	∘0▼	$0^\circ \ 08'$	0°	、11'」 /ま 0°				4		9]
図上の角度	4	_0,	$0^\circ 18'$	_0∽	$0^\circ 18'$	∘0▼	$0^\circ 20^{\prime}$	0.03°	ډ Γ ⊿ 0° 、 0°							
: ーズ製作	3	180° ⊾	$0^{\circ} \ 27'$	180° ⊾	$0^{\circ} \ 27'$	180° ⊾	$0^{\circ} 27'$	0°	ミす。例えは	定位置						
置(内ベロ	3	_0,	$0^\circ \ 10'$	⊿ 0°	$0^\circ 13'$	_0,	$0^\circ 15'$	0.08°	〔斜方向を示	【水平度測						
0°位位	\bigcirc	_0,	0° 11'	_0,	$0^\circ 12'$	_0,	$0^\circ 14'$	0.05°	砂料(建工)							
	圧力 (kPa)	ÚÚ	00) C	07	¢	D	最大差								

Table 3.3 内ベローズ製作完成時の水平度測定結果(試験用治具による吊り状態)

Table 3.4 内ベローズ製作完成時の水平度測定結果(定盤置き状態)

	底面	270° ⊾	$0^{\circ} 21^{\circ}$	270° 🕨	$0^\circ~21'$	270° 🕨	0° 21'	270° ⊾	0° 21'	270° 🕨	0° 21'	0°	
	Ð	270° ►	$0^{\circ} 21^{\circ}$	270° ⊾	$0^\circ 21'$	270° ⊾	$0^\circ 22'$	270° ⊾	$0^\circ 22'$	270° ⊾	0° 22'	0.02°	
位置	(1)	270° ⊾ 270° ⊾	0° 13'	270° ⊾	$0^\circ 13'$	270° ⊾	$0^\circ \ 10^{\prime}$	270° ⊾	$0^\circ 15'$	270° ⊾	$0^\circ \ 12'$	0.08°	
$_{\circ}06$	®	270° ⊾ ⊿°072	1° 00'	270° ⊾	$1^\circ \ 00'$	270°	$1^\circ \ 00'$	270° ⊾	$1^\circ \ 00'$	270°	1° 00'	0°	
	(\mathbb{Z})	270° ⊾ 270° ⊾	$0^{\circ} 14'$	270° ⊾	$0^\circ 15'$	∠270° ⊾	$0^\circ 14'$	270° ⊾	0° 17'	270°	0° 12'	0.08°	
	(\mathbb{I})	270° ⊾ 270° ⊾	0° 16'	270° ⊾	0° 17'	270°	$0^\circ 15'$	270° ⊾	$0^\circ \ 19'$	270°	$0^\circ \ 15'$	0.06°	
(底面	°0–	$0^\circ 16'$	∘0▼	0° 14'	₀0►	$0^\circ 15'$	₀0▼	$0^\circ 16'$	₀0দ	$0^\circ 16$	0.03°	
)角度位置	9	°0 ~	$0^\circ 13'$	°0 ~	$0^\circ 12'$	₀0►	$0^\circ 12'$	∘0▼	0° 08'	₀0►	0° 08'	0.08°	司様
製作図上の	(4)	₀0 r	$0^\circ 18'$	°0 ~	$0^\circ 20^\prime$	₀0►	$0^\circ \ 20'$	∘0▼	$0^\circ \ 20'$	_0►	$0^\circ \ 20'$	0.03°	able 3.3 <i>と</i> [
<u> </u> ベローズ	B	180° ⊾ ?° ? :	0° 25'	180° ⊾	$0^\circ 24'$	180°	$0^\circ \ 25'$	180° ⊾	$0^\circ \ 25'$	180° \blacktriangleright	$0^\circ 25'$	0.02°	圳定位置】T
位置(内	(\mathbb{Z})	₀0 ⊭	$0^\circ 18'$	∘0▼	$0^\circ 15'$	₀0 	$0^\circ 20^{\prime}$	∘0▼	$0^\circ 16'$	₀0 	0° 21'	0.08°	【水平度測
0°		_0,	0° 17'	₀0▼	$0^\circ 15'$	_0,	$0^\circ 19'$	₀0▼	$0^\circ 16'$	_0,	$0^\circ~21'$	0.1°	
	压力 (MPa)	0	þ		-0.04	Ċ	Ο		0.020	Ċ	0	最大差	

	n)	270°	439	412	397.5	388	395	408	436	462	468	465	440	治具			測定	定盤
国の大阪	置き状態) (m 1	180°	439	411	397.5	387	395	407.5	436	462	469	464	438	試驗用		<i>←</i>	<u> </u>	\rightarrow
又限、 斤崩 外	測定(定盤床間	$_{\circ}06$	439	410	397	388	395	408	436	462	468	464	440		<u> </u>			
まによる目り、	変位演	0°	439	413	398	388	395	408	436	462	468	465	440	【変位測定】		(4)		<u></u>
		圧力 (kPa)	100.4	80	70	60	70	80	100.4	120	125	120	100					
文 [[4]]从广加不	態) (mm)	270°	470	470	442	414	390	411	439	470	470			下げ			変位測定	
1 FJC/JX HAT V)	こよる吊り状	180°	470	470	442	414	390	411	439	470	470					<		→
	(試験用治具)	90°	469	470	442	414	390	411	439	470	470			Ð		(4)		
laure o.o	変位測定	0°	470	470	442	414	390	411	439	470	470			【変位測定】				
		压力(kPa)	100	90.8	70.6	50.3	30.1	50	70.2	92.7	100							

内ベローズ戦作完成時の変位測定結果(試験用治見によろ吊り状能、定盤床置き状能) Table 3.5



Fig.3.14 水平度測定用の水準器(TESA 製 Clinobevel 1-USB)



Fig.3.15 内ベローズ製作完成時の変位測定結果(試験用治具による吊り状態)



Fig.3.16 内ベローズ製作完成時の変位測定結果(定盤床置き状態)

3.4 アキュムレータの組立における水平度測定

ベローズメーカー工場で完成した内ベローズは、アキュムレータ組立工場に輸送して、外ベロ ーズや他の部品とともに完成品に組み立てたが、組立工程の段階でも水平度測定と動作確認を行 った。アキュムレータ1号機及び2号機の製作では、水平度測定は実施しておらず、動作確認は 内ベローズの完成時、アキュムレータの組立製作時の内ベローズと外ベローズの組立終了時及び アキュムレータの完成時に行った。今回、各工程で水平度確認を行ったのは、溶接前後での溶接 ひずみの影響がないことを確認するためで、万が一異常が生じた際には溶接補修での回復が可能 な工程での確認とした。

水平度測定及び動作確認以外では、外ベローズと内ベローズの組立後、外筒を溶接したとき、 及び内筒を溶接したときに、外観検査、寸法検査、溶接検査、気密検査、耐圧検査、ヘリウムリー ク検査を実施し、異常がないこと、規定値以内であることを確認した。

(1) 内ベローズへの容器フランジ、外ベローズ用フランジ及びサポート取付け時の水平度測定 内ベローズへの容器フランジ、外ベローズ用フランジ及びサポートを取り付けた際の水平度 測定の状況を Fig.3.17 に、結果を Table 3.6 に示す。測定位置は Table 3.6 に示したように、 内ベローズ接続パイプ側面、容器フランジ面、下部ストッパー上面、下部ストッパー側面 2 点、 底面の 6 点である。動作試験は、容器フランジを昇降架台に載せて、内ベローズを吊下げた状 態と同様の状態で実施し、ベローズ内部に窒素ガスで段階的に加減圧し、下部ストッパー上面 から各ベローズブロックの距離を金尺で測定して伸び縮みを確認した(Table 3.7)。



Fig.3.17 内ベローズへの容器フランジ及び外ベローズ用フランジ取付け時の 水平度測定状況

Table 3.6 内ベローズへの容器フランジ及び外ベローズ用フランジ取付け時の水平度測定結果(サポート吊下げ状態)(1/2)

	底面	0.03°	
	0	0.08°	
立置	4	0.08°	
90°	3	0.03°	
	3	0°	
		0.02°	
	底面	0.02°	
)角度位置)	2	0.06°	レ の 一 日 の 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一
製作図上の	4	0.03°	
マローズ	®	0.03°	「「」「」」
位置(内	3	0.02°	水平
$^{\circ}0$		0°	
		最大差	



(mm)	270°	464	462	434	406	383	383	382	403	431	461	464	立 予B 不
、吊下げ状態)	180°	464	463	435	408	383	384	383	403	432	462	464	
定 (サポート	90°	464	463	434	407	383	383	383	403	431	461	464	
変位測	0°	464	463	434	407	383	383	383	403	431	461	464	
	压力(kPa)	100	06	02	$\overline{20}$	30	25	30	$\overline{20}$	70	06	100	

JAEA-Technology 2019-013

Table 3.7 内ベローズへの容器フランジ及び外ベローズ用フランジ取付け時の変位測定結果(サポート吊下げ状態)

水平度を測定した結果、最大差は 0.08 ° であり、目標とした 0.1 ° 以内を満足した。また、 Fig.3.18 に示すように、動作確認では設計通り 80 mm のストロークの伸び縮みを確認し、ヒ ステリシスがほとんどない動作を確認した。このとき、わずかではあるが動きが鈍くなるとこ ろがあったが、設計通りの擦りでひっかかりはないと判断した。ベローズメーカー工場からア キュムレータ組立工場への輸送の際に状態が多少変化したことによるものと考える。



Fig.3.18 内ベローズへの容器フランジ及び外ベローズ用フランジ取付け時の変位測定結果 (サポート吊下げ状態)

(2) 内ベローズと外ベローズの組立時の水平度測定

内ベローズへの容器フランジ、外ベローズ用フランジ、吊下げ用サポートの組立後、外ベローズ部と連結する。内ベローズの心棒と外ベローズの心棒はネジ式で仮止めし、外ベローズを被せて外ベローズの上部において上部キャップで心棒と外ベローズを固定する。この内ベローズと外ベローズが組み立てられた状態で再度水平度測定と動作確認を行った。水平度測定の結果を Table 3.8 に、水平度測定の状況を Fig.3.19 に示す。この段階が、内ベローズが目視で確認できる最後の状態である。動作確認の結果を Table 3.9 及び Fig.3.20 に示す。 Table 3.8 内ベローズと外ベローズの組立後の水平度測定結果(1/2)

	0	位置(内	ベローズ	製作図上の	角度位置)				90° 1	位置		
压力 (MPa)		\mathbb{S}	3	(4)	2	底面	(]	$(\overline{\mathcal{Z}})$	3	(4)	2	底面
C	180° ⊾	₀0▼	180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾	90°	90°	270° ⊾	90°	270° ⊾	270° ⊾
0	0° 19'	0° 39'	$1^\circ \ 00'$	$0^\circ \ 12'$	0° 22'	$0^\circ \ 10'$	$0^\circ \ 01'$	$1^\circ \ 09'$	0° 45'	0° 04'	$0^\circ \ 06'$	$0^\circ \ 06'$
	180° ⊾	₀0▼	180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾	90° ⊾	90° ⊾	270° ⊾	90° ⊾	270° ⊾	270° ⊾
10.0-	0° 19'	0° 39'	0° 59'	$0^\circ 12'$	$0^\circ~22'$	$0^\circ \ 09'$	$0^\circ \ 00'$	$1^\circ \ 09'$	$0^{\circ} 44'$	0° 04'	$0^\circ \ 05'$	$0^\circ \ 06'$
	180° ⊾	_0~	180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾	90°	▼ ₀06	270° ⊾	90°	270° ⊾	270° ⊾
20.0-	0° 19'	0° 39'	1° $01'$	$0^\circ 15'$	0° 22'	0° 09'	0° 02'	$1^\circ \ 09'$	0° 45'	$0^\circ \ 04'$	$0^\circ \ 05'$	$0^\circ \ 06'$
		_0~		180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾		▼ 。06		90°	270° ⊾	270° ⊾
-0.03	I	0° 39'	—	$0^\circ 15'$	0° 23'	$0^\circ \ 09'$	-	$1^\circ \ 09'$	I	$0^{\circ} 04'$	0° $05'$	$0^\circ \ 05'$
		_0~		180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾		▼ 。06		90°	270° ⊾	270° ⊾
-0.04	I	0° 39'	I	$0^\circ 13'$	$0^\circ \ 23'$	$0^\circ \ 09'$	I	$1^\circ 08'$		$0^\circ 03'$	$0^\circ 05'$	0° 07'
		∘0►		180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾		▼ ₀06		90°	270° ⊾	270° ⊾
c0.0-	I	$0^{\circ} 38'$	I	$0^\circ 15'$	$0^\circ 23'$	$0^\circ 00'$	I	$1^\circ \ 09'$	I	$0^\circ \ 06'$	$0^\circ \ 05'$	$0^\circ 06'$
		°0 ~		180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾		▼ ₀06		90°	270° ⊾	270° ⊾
-0.06	I	$0^{\circ} 38'$	I	0° 14'	0° 22'	$0^\circ \ 10'$	I	$1^\circ \ 09'$	I	0° 07'	0° $05'$	$0^\circ 06'$
		₀0▼		180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾		90° ⊾		90° ⊾	270° ⊾	270° ⊾
10.0-		$0^{\circ} 38'$	I	$0^\circ 14'$	$0^\circ~22'$	$0^\circ \ 10'$		$1^\circ 09'$		$0^\circ 06'$	$0^\circ 03'$	0° 07'
		_0~		180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾		▼ 。06		90°	270° ⊾	270° ⊾
on.u-		$0^{\circ} 39'$		$0^\circ \ 16'$	0° 22'	$0^\circ \ 10'$		$1^\circ \ 09'$		0° 06'	$0^\circ \ 06'$	$0^\circ \ 05'$
		_0~		180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾		▼ ₀06		90°	270° ⊾	270° ⊾
10.0-		0° 39'		$0^\circ \ 15'$	0° 24'	$0^\circ \ 09'$		$1^\circ \ 09'$		0° 06'	$0^\circ \ 05'$	$0^\circ \ 10^\prime$
		_0~		180° L	180° ⊾	180° ⊾		▼ ₀06		90°	270° ⊾	270° ⊾
00.0-		$0^{\circ} 39'$	l	$0^\circ 13'$	0° 22'	$0^\circ \ 09'$	l	$1^\circ \ 09'$	l	0° 07'	0° $05'$	$0^{\circ} 07'$
		∘0►	I	180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾	I	90° ⊾	ļ	90° ⊾	270° ⊾	270° ⊾
60.0-		0° 39'		$0^\circ 15'$	0° 23'	$0^\circ 10'$		$1^\circ \ 09'$		$0^\circ 06'$	$0^\circ 05'$	$0^{\circ} 07'$

(2/2)
立後の水平度測定結果
ミローズの組立
内ベローズと外
Table 3.8-2

	0	位置(内	ベローズ	製作図上の	角度位置)				90°	立置		
		3	3	4	2	底面		3	3	4	2	底面
		_0,		180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾		90° ⊾		90° ⊾	270° ⊾	270° ⊾
-0.04		$0^{\circ} 39'$		$0^\circ 15'$	$0^\circ 22'$	0° 11'	I	$1^\circ \ 09'$		$0^\circ 06'$	$0^{\circ} 04'$	0° 07'
		°0 ~		180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾		90° ⊾		90° ⊾	270° ⊾	270° ⊾
-0.03		0° 39'		$0^\circ 15'$	$0^\circ 21'$	0° 09'	I	$1^\circ 08'$	I	0° 07'	$0^\circ 05'$	$0^\circ 08'$
		₀0▼	180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾		90° ⊾	270° ⊾	90° ⊾	270° ⊾	270° ⊾
-0.02		0° 39'	1° 01'	$0^\circ 13'$	$0^\circ 24'$	$0^\circ 10'$	I	$1^\circ \ 09'$	0° 44'	0° 07'	0° 04'	0° 07'
5	180° ⊾	_0,	180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾	90° ⊾	90° ⊾	270° ⊾	90° ⊾	270° ⊾	270° ⊾
10.0-	$0^{\circ} 19'$	0° 39'	$1^\circ 00^{\prime}$	$0^\circ 15'$	$0^\circ 24'$	0° 08'	0° 00'	$1^\circ \ 09'$	0° 44'	0° 07'	0° 04'	$0^\circ \ 06'$
¢	180° ⊾	_0,	180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾	90°	\bullet 00°	270° ⊾	90°	270° ⊾	270° ⊾
0	$0^\circ \ 19'$	$0^{\circ} 39'$	$1^\circ 00^{\prime}$	$0^\circ 15'$	$0^\circ 22'$	$0^\circ 10^\prime$	0° 00'	$1^\circ \ 09'$	$0^\circ 46'$	$0^{\circ} 04'$	$0^\circ 06'$	$0^\circ 05'$
5	180° ⊾	_0▼	180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾	180° ⊾	90° ⊾	90° ⊾	270° ⊾	90° ⊾	270° ⊾	270° ⊾
0.01	$0^{\circ} 19'$	0° 39'	$1^\circ \ 00'$	$0^\circ 13'$	$0^\circ 22'$	0° 09'	$0^\circ 00'$	$1^\circ \ 10^{\prime}$	$0^\circ 46'$	0° 03'	0° 07'	$0^\circ \ 05'$
最大差	0°	0.02°	0.03°	0.06°	0.05°	0.05°	0.03°	0.03°	0.03°	0.07°	0.07°	0.08°
		【水平度測	定位置		4	固						
					0							
					() () () () () () () () () () () () () ()						
					t							
					馬面							

/				
	変位測	定(サポート	吊下げ状態)	(mm)
压力(kPa)	0°	90°	180°	270°
100	464	464	464	464
06	457	458	456	458
80	448	446	447	446
70	436	436	436	436
60	426	424	424	424
50	414	414	413	414
40	402	403	402	402
30	392	392	392	392
20	384	384	384	384
30	686	388	388	387
40	262	397	397	397
50	407	407	408	407
60	418	417	418	418
70	429	428	429	428
80	441	441	441	441
00	454	454	452	454
100	464	464	464	464
001	404 【変位測定】		$\begin{array}{ccc} & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & &$	404 位測定 A-B



Fig.3.19 内ベローズと外ベローズ組み立て時の水平度測定状況



Fig.3.20 内ベローズと外ベローズ組み立て時の変位測定結果

水平度測定の結果、最大差は 0.08 ° であり、目標とした 0.1 ° 以内を満足した。動作確認 では設計通り 80 mm のストロークの伸び縮みを確認したが、行き戻りの圧力で最大 8 mm の ヒステリシスが生じた。これは外ベローズと連結した影響で、外ベローズ内の心棒の擦れが主 な要因であるが、2 号機では約 40 mm のヒステリシスが生じたことに比べると、3 号機のヒス テリシスの値は十分に小さく、±4 mm の差は全体ストローク 80 mm に対して 1/20 であり、 許容範囲内である。

(3) アキュムレータ完成時の水平度測定

外ベローズ部との連結後、水素が流れる領域である内筒を溶接して閉じ、ベローズ内部のヘ リウムガスが予冷されるジャケット部の外筒を溶接して、ヘリウム配管をつなげ、アキュムレ ータの完成形とした。この完成形で水平度測定と動作確認を行ったが、内ベローズは内筒に覆 われるので、外ベローズの伸縮が主な確認対象となる。水平度測定の結果を Table 3.10 に、水 平度測定の状況を Fig.3.21 に示す。動作確認の結果を Table 3.11 及び Fig.3.22 に示す。

水平度測定の結果、最大差は 0.08 ° であり、目標とした 0.1 ° 以内を満足した。動作確認 では設計通り 80 mm のストロークの伸び縮みを確認し、ヒステリシスは行き戻りの圧力で最 大 5 mm 生じた。内ベローズと外ベローズの組立時よりもヒステリシスは小さくなったが、動 作の馴染みや 1~2 mm の測定誤差と考えられる。

			Table $\hat{\epsilon}$	3.10 アキュ	ムレータ完成	時の水平度後	训定(1/3)			
	45°位置。	(アキュムレータ製	したののののでです。 していていていた。 していていていた。 していていていた。 していていた。 していていた。 していていた。 していた。 し	ニベローズ製作区]上角度+45°)			135°位置		
压力 (MPa)	$(\overline{\mathbf{I}})$	3	3	(7)	3	T	3	Ê	4	2
C	- 45°	225° ⊾	225° ⊾	225° ⊾	225° ⊾	⊿ 135°	⊿ 135°	315° ⊾	315° ⊾	315° ►
0	$0^\circ~38'$	0° 08'	$0^\circ~25'$	0° 27'	$0^\circ~25^{\circ}$	$1^\circ \ 10^{\circ}$	0° 08'	$0^\circ 30'$	0° 09'	$0^\circ \ 08'$
10.0	- 45°	225° ►	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° ⊾	315° ⊾	315° ►
10.0-	0° 40°	0° 07'	$0^\circ \ 24'$	0° 27'	$0^\circ 30^{\prime}$	$1^\circ 08'$	0° 07'	$0^\circ~26'$	0° 09'	$0^\circ \ 08'$
	- 45°	225° ⊾	225° 🔪	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° ⊾	315° 🕨	315° ►
20.0-	$0^{\circ} 38'$	$0^{\circ} 08'$	$0^\circ 24'$	$0^\circ~28'$	$0^\circ \ 31'$	$1^\circ 09'$	$0^\circ \ 08'$	0° 27'	0° 07'	0° 07'
	- 45°	225° ►	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° 🕨	315° 🕨	315° ►
-0.03	$0^{\circ} 38'$	0° 08'	$0^\circ 25^{\prime}$	$0^\circ 28'$	$0^\circ~26$	$1^\circ 08'$	0° 07'	$0^\circ 30'$	0° 07'	$0^\circ \ 06'$
	- 45°	225° ►	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° ⊾	315° ⊾	315° ►
-0.04	0° 38'	0° 09'	$0^\circ 25^{\prime}$	0° 28'	$0^\circ 26'$	$1^\circ 07^{\prime}$	$0^\circ 06'$	$0^\circ~29'$	$0^{\circ} 08'$	$0^\circ \ 06'$
	- 45°	225° ⊾	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	▲ 135°	⊿ 135°	315° ⊾	315° 🕨	315° ►
e0.0-	$0^{\circ} 38'$	0° 07'	$0^\circ~25'$	$0^\circ~28'$	$0^\circ 26'$	$1^\circ 08'$	0° 07'	$0^\circ 30'$	0° 07'	0° 04'
	- 45°	225° 🕨	225° .	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿135°	315° 🔪	315° ⊾	315° ⊾
90.0-	$0^{\circ} 39'$	0° 07'	$0^\circ 25^{\prime}$	$0^\circ~28'$	$0^\circ 26'$	$1^\circ \ 10'$	0° 07'	$0^\circ~28'$	0° 07'	0° 04'
	- 45°	225° ►	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° ⊾	315° ⊾	315° ►
-0.0-	$0^\circ~38'$	0° 08'	$0^\circ~25'$	$0^\circ~28'$	$0^\circ 26'$	$1^\circ 08'$	0° 07'	$0^\circ~29'$	0° 07'	0° 04'
	- 45°	225° ►	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° 🕨	315° 🕨	315° ►
20.0-	$0^{\circ} 38'$	0° 08'	$0^\circ 24'$	$0^\circ~28'$	$0^\circ 30'$	$1^\circ 09'$	$0^\circ 08'$	$0^\circ~27'$	$0^\circ \ 08'$	$0^\circ \ 05'$
	- 45°	225° 🕨	225° .	225°	225° \blacktriangleright	⊿ 135°	⊿135°	315° \blacktriangleright	315° \blacktriangleright	315°
000.U-	$0^\circ \ 38'$	$0^\circ \ 08'$	$0^\circ 25'$	$0^\circ~28'$	$0^\circ \ 31'$	$1^\circ \ 09'$	0° 07'	$0^\circ \ 30'$	$0^\circ 08'$	$0^\circ \ 05'$
00.0-	- 45°	225° 🕨	225° \blacktriangleright	225° \blacktriangleright	225° 🛰	⊿ 135°	⊿ 135°	315° \blacktriangleright	315° \blacktriangleright	315° \blacktriangleright
on.u-	0° 38'	0° 08'	0° $25'$	$0^\circ~28$	0° 27'	$1^\circ \ 10'$	0° 07'	$0^\circ~28'$	0° 07'	$0^\circ \ 06'$
LO O-	▲ 45°	225° ⊾	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° 🕨	315° ⊾	315° ⊾
10.0-	$0^{\circ} 38'$	$0^{\circ} 07'$	$0^\circ 25'$	$0^{\circ} 27'$	0° 29'	1° 09'	$0^{\circ} 07'$	$0^{\circ} 30'$	$0^{\circ} 07'$	0° $05'$

	45°位置。	(アキュムレータ製	と作図上の角度位置	=ベローズ製作図	上角度+45°)			135°位置		
	Ē	\mathbb{C}	3	(4)	2	(]	3	3	(4)	2
	⊿ 45°	225° ⊾	225° ⊾	225° ⊾	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° ⊾	315° ⊾	315° ⊾
-0.00	$0^\circ 38'$	0° 08'	$0^\circ 25'$	$0^\circ~28'$	$0^\circ~32'$	$1^\circ 09'$	0° 07'	$0^\circ \ 30'$	0° 07'	0° 04'
	▲ 45°	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° 🕨	315° 🕨	315° ⊾
0.05	0° 38'	0° 07'	$0^\circ 25'$	0° 27'	$0^\circ 28'$	$1^\circ \ 10^\circ$	0° 07'	$0^\circ~29'$	0° 07'	0° 06'
	⊿ 45°	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° ⊾	315° 🕨	315° \blacktriangleright
-0.04	$0^\circ 38'$	0° 07'	$0^\circ 25'$	$0^\circ~28'$	$0^\circ \ 31'$	$1^\circ 09'$	0° 07'	$0^\circ~29'$	0° 07'	0° 06'
	▲ 45°	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° ⊾	315° 🕨	315° ⊾
-0.03	$0^\circ 38'$	0° 08'	$0^\circ 25'$	$0^\circ~28'$	$0^\circ~28'$	$1^\circ 09'$	0° 07'	$0^\circ 29'$	0° 07'	$0^\circ 06'$
	▲ 45°	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° ⊾	315° 🕨	315° ⊾
-0.02	$0^\circ 38'$	0° 08'	$0^\circ 25'$	$0^\circ~28'$	$0^\circ \ 30'$	$1^\circ 09'$	0° 07'	$0^\circ \ 30'$	0° 07'	0° 08'
100	▲ 45°	225° 🕨	225° ⊾	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° ⊾	315° 🕨	315° ⊾
10.0-	$0^\circ 38'$	0° 08'	$0^\circ 25'$	$0^\circ~28'$	$0^\circ 28'$	$1^\circ 09'$	0° 07'	$0^\circ \ 30'$	0° 07'	0° 08'
Ċ	⊿ 45°	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° ⊾	315° 🕨	315° \blacktriangleright
D	0° 38'	0° 08'	$0^\circ 25'$	$0^\circ~28'$	$0^\circ \ 31'$	$1^\circ 09'$	0° 07'	$0^\circ~29'$	$0^\circ \ 08'$	0° 04'
10.0	▲ 45°	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° ⊾	315° ⊾	315° \blacktriangleright
10.0	0° 38'	0° 07'	0° 25'	0° 28'	0° 31'	$1^\circ \ 00'$	0° 07'	0° 29'	0° 08'	0° $05'$
Ċ	▲ 45°	225° 🕨	225° 🛰	225° 🕨	225° 🕨	⊿ 135°	⊿ 135°	315° ⊾	315° \blacktriangleright	315° \blacktriangleright
D	$0^\circ~38'$	$0^\circ 08'$	$0^\circ 25'$	$0^\circ~28'$	$0^\circ \ 31'$	$1^\circ 09'$	0° 07'	$0^\circ \ 30'$	0° 07'	0° 09'

Table 3.10 アキュムレータ完成時の水平度測定(2/3)



Table 3.10 アキュムレータ完成時の水平度測定 (3/3)



アキュムレータ完成時の変位測定結果



Fig.3.21 アキュムレータ完成時の水平度測定状況



Fig.3.22 アキュムレータ完成時の変位測定結果

4. 工場製作時の水平度を維持した現地据付け方法

工場から現地に輸送する際の振動等による影響や、現地据付け時の移動や溶接によるひずみな どで工場製作時に達成した 0.1 [®] 以内の水平度を維持するように、現地据付けの工程においても 適時水平度を確認し、動作確認を行った。水平度測定及び動作確認以外では、現地では外観検査、 寸法検査、溶接検査、気密検査、ヘリウムリーク検査を実施し、異常がないこと、規定値以内で あることを確認した。完成後、低温試運転を実施して冷凍機としての運転に異常なく、アキュム レータの機能を満足することを確認した。低温試運転については次章で詳細を示す。

4.1 現地据付け要領

アキュムレータ 3 号機は外ベローズ部と内ベローズを含んだ容器部で分割できる構造とし、ア キュムレータ組立工場にて完成したアキュムレータを分割して、現地、MLFの 3F 大型機器取扱 室へ輸送した。

Fig.4.1 にアキュムレータ2号機と3号機の交換工事の手順を示す。2.4節で述べたように、ア キュムレータの交換工事の短縮化を検討して、セイフティボックス(真空槽)のトップフランジ ごと開放することなく、セイフティボックスの横にあるマンホールを利用した据付け要領とした。 これによって、1号機から2号機に交換した際のFig.2.3と比べて、作業量は少なくなった。



Fig.4.1 アキュムレータの交換作業要領(2号機から3号機へ交換)

据付け作業では、Fig.4.2 の真空容器天井の梁を利用して、Fig.4.3 のように①アキュムレータ 2 号機の外ベローズ部の切断、②切断した外ベローズ部の取出し、③内ベローズ部の取出しを約1 週間で行った。アキュムレータ 2 号機の内ベローズ部の取出しの実際の様子を Fig.4.4 に示す。 その後、次の 1 週間で Fig.4.5 の手順の通り、①新規アキュムレータの内ベローズ部を搬入し (Fig.4.6)、②セイフティボックス内の設置位置に吊下げ設置、外ベローズ部を搬入して、③外ベ ローズ部と内ベローズ部をフランジ構造部で接続した。この状態で動作確認を行い、水平度測定 及び伸縮の状況を確認した。結果については後述する。そして、④アキュムレータ周りの配管溶 接を行い、水素系統を閉じて、溶接検査、気密検査、最終的な動作確認を約 2 週間で実施するこ とで、全体で1ヶ月の工程となった。

使用したアキュムレータ2号機は放射性物質による汚染があるため、交換作業には汚染の拡大 や被ばくを抑えるために綿密な作業計画を検討した。付録Bにその概要を記す。



Fig.4.2 セイフティボックス(真空容器)天井の梁



Fig.4.3 アキュムレータ2号機の取出し手順



Fig.4.4 アキュムレータ2号機の取出しの様子

JAEA-Technology 2019-013





①SB内への内ベローズ部搬入



②内ベローズ部設置外ベローズ部搬入

③外ベローズ取付け



④配管復旧(溶接)

Fig.4.5 アキュムレータ3号機の据付け手順



Fig.4.6 アキュムレータ3号機の内ベローズ部の搬入状況

4.2 工場製作時の水平度を維持した据付け

アキュムレータを現地のセイフティボックス内に取付けるときも水平度測定、動作確認を行い、 取付け完了後には既存のレーザーレベル計を使った動作確認を行って、製作時の動作性能を維持 していることを確認した。

(1) セイフティボックス内取付け時の水平度及び動作確認

4.1 節の現地据付け要領で、セイフティボックス内に3号機外ベローズ部を設置して内ベロ ーズ部をフランジ構造部で接続した後、アキュムレータ周りの配管溶接を行って水素系統を閉 じて最終形態になった時に水平度測定と動作確認を行った。動作確認において、セイフティボ ックス上部のレーザーレベル計窓でアキュムレータのレベル計用天板までの距離を鋼尺で測 定している状況を Fig.4.7 に示す。このときに行った水平度測定の結果を Table 4.1 に、動作 確認結果を Table 4.2 及び Fig.4.8 に示す。



Fig.4.7 セイフティボックス内取付け時の動作確認の状況 (セイフティボックス上部レーザーレベル計窓にて測定)

Table 4.1 セイフティボックス内据付け後の水平度測定



Table 4.2 セイフティボックス内据付け後の変位測定結果



Fig.4.8 セイフティボックス内取付け時の動作確認結果

水平度測定の結果、最大差は 0.02 ° で、工場内完成時の値よりも良くなり、目標値 0.1 ° 以内を達成した。動作確認でも工場内完成時と同様に設計通りの 80 mm のストロークの伸 び縮みを確認でき、ヒステリシスも行き戻りの圧力で最大 5 mm の差で工場内完成時の値を 維持できた。

(2) レーザーレベル計による動作確認

アキュムレータは他の水素循環系機器とともにセイフティボックス(真空槽)に包括され るため、運転中目視による動作確認はできない。運転中のアキュムレータの動作状況は、セ イフティボックスの天井に一部ガラス窓を設置して、その窓からアキュムレータの外ベロー ズ上部の天板にレーザーを照射して反射光を測定するレーザーレベル計によって計測される。 セイフティボックス内にアキュムレータを据付け後、断熱材(SI)を設置し、レーザーレ ベル計を復旧して、水素循環系統とヘリウム系統の圧力差をつけることでレベル計の読みか ら動作確認を再度実施した。差圧に対するレベル計の読みを Fig.4.9 に示す。レベル計の測定 誤差がセンサーと変換器を合わせて約±1mm であった。アキュムレータの動作は、(1)の動 作と同様に 80 mm のストロークの伸び縮みを確認し、ヒステリシスは行き戻りの圧力で最 大 8 mm の差となった。レベル計の測定誤差を考慮すると、これまでの最大 5 mm の差に± 2 mm 以内の結果で工場完成時の値を維持できていると言える。



Fig.4.9 アキュムレータのレーザーレベル計による動作確認結果

5. 低温試運転時のアキュムレータの動作

アキュムレータ 3 号機への交換は配管の切断、溶接を伴い、機器の更新の工事のため、冷凍保 安規則に則って冷凍機の変更許可を受けた。工事終了後、低温試運転を行って、異常なく冷凍機 の運転が行えることを確認し、完成検査を受検する必要がある。このため、2013 年 12 月 16 日か ら 20 日まで冷却から昇温までの一連の低温試運転を行った。このとき、合わせてアキュムレータ の性能確認も実施した。一連の低温試運転のトレンドを Fig.5.1 に示す。

(1) 運転前の 1.5 MPa 水素雰囲気のアキュムレータ動作確認

試運転を始める前に、運転準備で水素ガスを水素循環系に充圧した際、運転圧 1.5 MPa でフル ストロークの動作確認を行った。動作確認は、ヘリウムストレージタンク側のヘリウム圧力を 1.5 MPa 固定で、水素循環系の水素圧力を変えてレベル計による測定を行った。2010 年にアキュム レータ 2 号機に更新した際も同様に行っており、Fig.5.2 に 2 号機の測定結果、Fig.5.3 に今回の 3 号機の結果を示す。アキュムレータ取付け時にレベル計で測定した結果(Fig.4.8)と比べて、 最大 8 mm だったヒステリシスが大きくなり、同じ差圧に対するレベル計の読みが最大 10 mm 程度のズレとなった。しかしながら、2 号機の結果と比べ、約 1/3 以下に抑えられてヒステリシス を向上させることができた。また、設置時と同様に 80 mm のストロークの伸び縮みを確認し、ス ムーズな動作で差圧とレベルの直線性を持ったアキュムレータが完成した。

(2) 低温試運転時のアキュムレータの動作

低温試運転は、2013年12月16日15時9分から冷凍機のクールダウンを開始し、12月17日 18時31分に定格状態(ヘリウム流量:275g/s、液体水素流量:185g/s、モデレータ入口水素温 度:18K)に到達した。従来と同様の冷却時間で、異常なく定格運転に移行した。

定格運転にて温度、圧力等冷凍機のプロセス値の安定状態を確認して、12月18日の午後から 運転中のアキュムレータの動作確認を行った。運転中の動作確認は、まず定格状態(約4300W) の水素ヒーターの出力を約3600Wから約5000Wの間を手動で増減させた。このとき、アキュム レータのレベルは定格状態で約65mmに対し、約47mmから約75mmの間でスムーズに変動し た。もう少し変動量を多くするため、液体窒素供給を停止して水素系の温度を約2K上げ、12月 19日にかけて再度液体窒素使用運転に移行して定格運転に戻した。アキュムレータレベルは定格 値約65mmから約41mmまで変動し、スムーズな動きが確認できた。

試験終了後、12月19日から20日にかけて冷凍機の運転を停止してウォームアップを行った。 これも従来と同様の昇温時間となり、冷却から昇温までの一連の低温試運転を異常なく終了した。





Fig.5.2 アキュムレータ2号機のレーザーレベル計による動作確認結果(水素充圧時)



Fig.5.3 アキュムレータ3号機のレーザーレベル計による動作確認結果(水素充圧時)

6. ビーム入射運転時の低温水素循環系の性能

本報告書を執筆した 2019 年 1 月現在、MLF では 500 kW の陽子ビーム出力による利用運転が 行われており、アキュムレータ 3 号機は使用開始から約 25,000 時間の運転を経験し、運転中 40 mm 伸縮した場合の設計寿命の 50 万回に対して 10 mm 以上の伸縮を約 16,000 回行い、低温水 素システムの圧力変動抑制機構としての役割を十分発揮して、システムの安定運転に寄与してい る。2018 年 7 月には、核破砕中性子源の最終目標である 1 MW 相当の陽子ビーム出力による試 験運転が実施され、本低温水素システムを始め、各設備の性能確認が行われた。低温水素システ ムにおける状況をこれまでの結果と合わせて以下に示す。アキュムレータの動作を含めて低温水 素循環系が設計通りの性能を持つことを確認した。

2018年7月3日、1 MW 相当(932 kW)の陽子ビームを中性子源に入射する試運転を行った。 Fig.6.1 にビーム入射時の水素循環系内状態変化を 500 kW ビーム出力時のものと比較して示す。 (a)が中性子源のターゲットに到達したビーム出力、(b)がモデレータ出入口温度、(c)がヒーター出 力、(d)がアキュムレータレベル、(e)が水素循環系内の圧力の変化を示す。横軸は時間(s)を示し、 0(s)が陽子ビームの入射した時点である。

モデレータ出口温度については、ビームの入射から約 18 秒後に上昇を始め、524 kW ビーム出 カの場合は 1.6 K、932 kW ビーム出力の場合は 2.5 K の温度上昇となった(Fig.6.1(b) 参照)。 中性子源に近接したモデレータ容器で中性子によって発生した液体水素と容器構造材の核発熱は、 液体水素を温め、断熱多重配管を通って、水素循環ポンプやアキュムレータ、熱交換器などの水 素循環系機器を包括するセイフティボックスに到達して熱交換器で除熱され、循環する(Fig.1.1 参照)。モデレータの温度センサーはモデレータ容器から約 15 m 離れたセイフティボックスに戻 った位置に設置しているため、温度上昇の変化に約 18 秒の時間差が生じる。

Fig.1.3 で示したように、低温水素システムではアキュムレータ緩衝とヒーター制御を備えて、 陽子ビームの ON/OFF 時の温度変動によって非圧縮性の液体水素循環系閉ループで生じる大き な圧力変動を抑制している。モデレータ出口温度が所定の温度まで上昇すると、ヒーターがモデ レータ容器での核発熱分の熱補償を行うため、ヒーター出力は、Fig.6.1(c) に示すように、524 kW ビーム出力の場合は 1.89 kW、932 kW ビーム出力の場合は 3.3 kW 低下した。これらの低下量 は、ビーム入射時の水素循環系内圧力調整用の制御プログラムでヒーター設定値として事前に設 定している。モデレータ容器で発生した核発熱分はヒーターで保障するが、モデレータ容器から ヒーターまでの温度上昇に対する体積膨張はアキュムレータで緩衝する。Fig.6.1(d)に示すように、 アキュムレータは 524 kW ビーム出力の場合は約 11 mm、932 kW ビーム出力の場合は約 22 mm 縮んで圧力上昇を吸収する。この結果、圧力上昇は、524 kW ビーム出力の場合は約 35 kPa、932 kW ビーム出力の場合は約 65 kPa に抑えられる (Fig.6.1(e) 参照)。



Fig.6.1 932 kW と 524 kW のビーム入射時の水素循環系内状態変化

アキュムレータ3号機を使用し始めてから1MW相当の陽子ビームの入射試験運転に至るまでの期間における陽子ビーム出力に対する水素循環系内の圧力変化をFig.6.2 に示す。陽子ビーム出力に対して水素循環系内の圧力変化はほぼ比例している。ビーム出力932kWまでの結果を外挿すると、1MW時の差圧は73kPaであり、設計許容差圧の80kPa以内に圧力変化を抑えられることが推測できる。Fig.6.3は、陽子ビーム出力に対するアキュムレータのレベル変化を示したものである。アキュムレータの伸縮はビーム出力に比例し、直線性のある動作性能を持っていることが確認できた。



Fig.6.2 ビーム入射時における水素循環系内圧力変化



Fig.6.3 ビーム入射時におけるアキュムレータレベル変化

7. まとめ

J-PARCの核破砕中性子源を構成する低温水素システムで、加速器から供給される陽子ビームの 受入及び停止に伴う負荷変動による水素系内の圧力変動を抑えるために備えたアキュムレータに ついて、高耐圧、長寿命化の開発を行い、アキュムレータ3号機を製作した。本研究開発では、ベ ローズメーカーと肉厚 0.8 mm の溶接ベローズの製作技法を開発し、溶接ベローズを製作すると ともに、ベローズブロックや溶接ビードの寸法検査を行い、溶接部やベローズブロックの健全性 を確認した。特に、アキュムレータの機能に係る溶接ベローズの伸縮性やベローズの寿命を低下 させないように水平度を重視し、設計目標値を0.1 °以内と設定した。そして、製作・組立時及び 据付け時に水平度管理に十分に注意を払い、据付け後の水平度が0.02 °と目標値を満足する製品 を完成させた。また、水平度、ヒステリシスが各製作工程段階でどの程度変化するか、初めてデ ータを取得した。この結果、ベローズ単体の性能を完成まで維持して、2.0 MPaの耐圧性能を持 ち、設計寿命1万回のアキュムレータ3号機を製作・設置することができた。今回開発した製作要 領は、今後の予備機の製作時に精度管理の基準となるものである。

設置後に実施した低温試運転では、クールダウン、定格運転、ウォームアップの一連の試運転を 異常なく遂行し、ヒーター及び液体窒素運転を利用した動作確認でも運転中のアキュムレータの スムーズな動作を確認した。また、1.5MPaの水素雰囲気下で動作試験を行い、2号機よりもヒス テリシスを約1/3に抑えられることを確認した。

また、2018年7月3日に1 MW相当(932 kW)の陽子ビームを入射する試験運転を連続的に約1 時間行い、この3号機アキュムレータとヒーターが水素循環系の圧力変動抑制機器としての機能を 果たすことを確認した。この結果、アキュムレータ3号機は、低温水素システムに必要な圧力変動 抑制機能としての性能を有し、目標とする1 MW陽子ビームでの運転においても、低温水素システ ムの安定性確保に必要な性能を発揮できる見通しを得た。

謝辞

アキュムレータ 3 号機の製作において、特に水平度管理の点で、アキュムレータの内ベローズ 製作にあたってはイーグル工業株式会社、イーグルブルグマンジャパン株式会社、アキュムレー タの組立製作にあたっては株式会社ジェック東理社、現地据付け工事にあたっては大陽日酸株式 会社の方々から多くの協力を得ました。冷凍機運転及び測定データ整理において日本アドバンス トテクノロジー株式会社にご協力いただきました。アキュムレータ現地工事では、J-PARC セン ター安全ディビジョン放射線安全セクションと中性子源セクションの多くの方々に貴重な助言と ご協力をいただき、ここに深く謝意を表します。
参考文献

- 1) 物質・生命科学実験施設建設チーム,大強度陽子加速器プロジェクト 物質・生命科学実験施 設技術設計書, JAERI-Tech 2004-001, 2004, pp. 369-471.
- Aso, T. et al., Design result of the cryogenic hydrogen circulation system for 1 MW pulse spallation neutron source (JSNS) in J-PARC, AIP Conference Proceedings, vol.823, no.1, 2006, pp. 763-770.
- 3) 加藤崇ほか, J-PARC 中性子源と低温水素システム, 低温工学, vol.42, no.8, 2007, pp.244-254.
- Materials and Life Science Division, Neutron Source Section, Technical Design Report of Spallation Neutron Source Facility in J-PARC, JAEA-Technology 2011-035, 2012, pp. 109-204.
- 5) Takada, H. et al., Materials and Life Science Experimental Facility at the Japan Proton Accelerator Research Complex I: Pulsed Spallation Neutron Source, Quantum Beam Science, vol.1, no.2, 2017, 8; https://doi.org/10.3390/qubs1020008
- 6) Hasegawa, S. et al., Numeral Analysis for the Emergency Discharge of the Hydrogen Loop of JSNS, Proceedings of the 17th Meeting of the Int. Collaboration on Advanced Neutron Sources, Santa Fe, USA, 2005, pp. 402-409.
- 7) Tatsumoto, H. et al., Pressure control characteristics of the cryogenic hydrogen system for a 300-kW proton beam operation, Proceedings of ICEC-23 and ICMC 2010, Wroclaw, Poland, 2010, pp. 1009-1014.
- 8) Tatsumoto, H. et al., Performance test of a centrifugal supercritical hydrogen pump, Proceedings of ICEC-23 and ICMC 2010, Wroclaw, Poland, 2010, pp. 377-382.
- 9) Oak Ridge National Laboratory, Spallation Neutron Source Final Safety Assessment Document for Neutron Facilities, 102030102-ES0016-R03, 2011.

This is a blank page.

付録A. アキュムレータ1号機から3号機の仕様等の比較

アキュムレータ1号機、2号機、3号機について仕様の違いや製作時の条件についてまとめた。



	3 号機		$2341 \mathrm{mm}$	484 mm	分割構造	$-258/40~^\circ\mathrm{C}$	$2.1013 \mathrm{MPaG}$	$2.7 \mathrm{MPaG}$	$2.2 \mathrm{MPaG}$	部品ごと、組立ごとの水平度を監 理して 0.1。以内を目標に製作		-258/40 $^\circ\mathrm{C}$	内压:-0.1013~2.0 MPaG	外圧:-0.1013~0.1 MPaG	$2.1013 \mathrm{MPaG}$	wm 08: 80 mm	内径:59 mm	単品:189 N/mm	連結: 14.5 N/mm	13	0.42 mm ダブルプライ (2 枚)	13 山	$10^6 \square$	専用治具による垂直性の確認	分割用フランジとの直角度	0.2mm条件付加	(太字は特記事項)
r ムレータの仕様 (1/2)	2 号機		2272 mm	484 mm	一体構造	-258/40 °C	2.1013 MPaG	2.7 MPaG	$2.2 \mathrm{MPaG}$	内ベローズの耐圧性が低いため、 気密・耐圧試験時の圧力に注意		-258/40 °C	内压:-0.1013~2.0 MPaG	外圧:-0.1013~0.1 MPaG	$2.1013 \mathrm{MPaG}$	外径:80 mm	内径:59 mm	単品:189 N/mm	連結: 15.8 N/mm	12	0.42 mm ダブルプライ (2 枚)	13 山	$10^6 \square$		専用治具による垂直性の確認		
Table 付 A-1 アキュ	1 号機		2360 mm	627 mm	一体構造	-258/40 °C	2.1013 MPaG	2.7 MPaG	$2.2 \mathrm{MPaG}$			-258/40 °C	内压:-0.1013~2.0 MPaG	外圧:-0.1013~0.1 MPaG	$2.1013 \mathrm{MPaG}$	外径:80 mm	内径:59 mm	単品:189 N/mm	連結:14.5 N/mm	13	0.42 mm ダブルプライ (2枚)	13 山	$10^6 \square$		専用治具による垂直性の確認		
		アキュムレータ全体	高さ(参考値)	外径(He ジャケット含)	一体構造 or 分割構造	設計温度	設計圧力	耐圧試験圧力	気密試験圧力	製作時留意点	外 ベローズ (成形 ベローズ)	設計温度	<u> 한</u> 글사 더 커		設計最大差圧	シューズの		ジン庁巻(牧井庙)	ハホ比致(参ち順)	連結数	板厚	山数	繰り返し寿命		製作時留意点		

Ċ
の仕様
X
] Z
~1
1
Ы
H
-333
R
付 A-1
le
p,

	3 号機		-258/40 °C	内压:-0.1013~2.0 MPaG	外圧:-0.1013~2.0 MPaG	2.1013 MPaG	外径:353 mm	内径:307 mm	mm/N 008	連結:約 64 N/mm	ß	0.8 mm シングルプライ (1 枚)	叮 21	0.08MPa 压力変動時:106回以上	0.08MPa 圧力変動+43mm 伸縮時:	$5 imes 10^5$ 回以上	2.0MPa	・板幅を広げて溶接性を改良	・溶接時の板押し付け治具の改良	・溶接点の寸法検査付加	・5ブロックの垂直性、バネ定数を	考慮した組み立て (各ブロック約	0.5mm の垂直ずれを相殺する組	み立て、動作始動を考慮してバネ	定数が大きいものを最上下段に	配置)
	2 号機		$-258/40~^\circ\mathrm{C}$	内压:-0.1013~2.0 MPaG	外王:-0.1013~2.0 MPaG	$0.96 \mathrm{MPaG}$	外径:350 mm	内径:310 mm	mm/N 067	連結:約 50 N/mm	2	0.4 mm ダブルプライ(2 枚)	17 山	0 08MP。 压力 恋 針 陆 · 106 回 1/1 ト	0.08Mba 圧力変動+43mm 伸縮時:	5×105回以上						同一板厚品の実績あり				
TAULT I TAULI DIMAL	1 号機		$-258/40~^\circ\mathrm{C}$	内圧: -0.1013~2.0 MPaG	外圧: -0.1013~2.0 MPaG	$2.1013 \mathrm{MPaG}$	外径:520 mm	内径:480 mm	単品:約 200 N/mm	連結:約 60 N/mm	3	0.8 mm シングルプライ (1 枚)	29 山	008MB。 王力恋 軸陸:106回以上	0.08MPa 压力変動+43mm 伸縮時:	5×105回以 十						同一板厚品の実績なし				
		内ベローズ (溶接ベローズ)	設計温度	부고락	民日二	設計最大差圧		用くしょう	ジャ庁巻「女女信)	くため(参ち)	連結数	板厚	山教		繰り返し寿命							製作時留意点				

Table 付 A-1 アキュムレータの仕様 (2/2)

(太字は特記事項)

付録 B. 使用済アキュムレータ 2 号機の取扱い作業要領

アキュムレータ 2 号機に交換した際、Fig.付 B-1 に示すように放射線サーベイの結果、配管の 入口で 0.1 µSv/hの線量当量率で、スミアでは 0.4 Bq/cm²の表面密度を超える配管内部表面の 放射化物の付着があると評価された。ゲルマニウム検出器で γ線測定を行った結果、Na-22 と Be-7 が検出された。これらの核種は、アルミ合金製のモデレータ部で中性子によってスパッタされ て液体水素の流れによって配管内面に付着したと考えられる。水素循環ポンプ入口ストレーナで は 100 µmメッシュの焼結金属であるがゆえに線量当量率は高く、また水素循環ポンプの下流の オルソパラ変換器では触媒がフィルタの役目をして線量当量率が高くなって、その下流では線量 当量率は下がる。



Fig.付 B-1 アキュムレータ2号機と水素循環ポンプ入口ストレーナの放射線サーベイ結果

このようにアキュムレータの内部は汚染されているので、アキュムレータ 3 号機への交換作業 においても放射性物質による汚染に対する作業要領を作成した。参考として、交換前の放射線サ ーベイ結果では Fig.付 B・2 に示したようにアキュムレータでは最大 0.5 μ Sv/h、水素循環ポンプ ストレーナで 5.4 μ Sv/h と 1 号機に比べて 5~7 倍の線量当量率であった。これは、1 号機では 4~120 kW の陽子ビーム出力を受けて運転し、積算出力は約 200 MWh であったことに対し、2 号機では 200~300 kW に上がって積算出力も約 1,700 MWd に増加したためと考えられる。



Fig.付 B-2 アキュムレータ3号機交換前のセイフティボックス内放射線サーベイ結果

(1) 作業の概要

アキュムレータの交換作業において配管の切断・開先取り、配管の溶接、溶接後の配管内 フラッシングで汚染を拡大する恐れがある作業と考えて、それぞれの対処を検討した。

作業場所は、セイフティボックスがある低温水素設備室で、放射性物質で汚染した機器を 取扱うための養生を行った(Fig.付 B·3)。セイフティボックス内は低温機器・配管等に施工 している断熱材(SI:スーパーインシュレーション)を取り外し、汚染の拡大を防ぐためと 溶接作業があるために防炎シートを敷いて、ゴミ等が飛散しないように縁はセイフティボッ クスの壁に沿ってシートを立ち上げて養生した。セイフティボックスの外側には、中での作 業準備、手袋交換、靴の履き替え、カートンボックス置き場などのためのエリアを作り、区 分けとゴミ等の飛散を防ぐために 20 cm 程度の高さの枠組みを利用して 2 重にしたビニルシ ートの養生を行った。その脇には約 2 m 四方のビニルシート養生を敷いて、切断配管の仮置 き場を準備した。



Fig.付 B-3 放射性物質汚染物取扱い作業に対する養生

作業時の基本的な防護機材は、タイベック、半面マスクの着用とした。基本的な作業体制 は、セイフティボックス内はメーカー作業員2名、セイフティボックスの外で養生エリアか らのサポート1名、養生エリアの外ではサポート2名と放射線安全セクションの立会い者1 名、とした。

(2) 配管切断・開先取り

配管切断では、パイプカッターを使用するため、ほぼ切粉や破片等が出ないので、カッタ ーや切断面による怪我への一般的な留意事項に注意した。

開先作業についてはヤスリによる削り粉が飛散しないように注意を払い、順次放射線サーベイを行いながら、Fig.付 B-4 に示すフローを基本的な手順として行った。

(3) 配管溶接

溶接作業では、溶接時の高温で放射性のガスが発生した場合を考慮して、局所排気のホースを直近にセットして溶接を行った。また、前述のように溶接後には放射線サーベイを行い、 汚染がないことを確認してから次の作業へ進んだ(Fig.付 B-5)。 (4) 配管内フラッシング

溶接終了後、配管内に異物が残らないように約 0.3~0.4 MPa の窒素ガスでフラッシング を行うが、異物を補足するためのウエスをセットした後、さらに汚染した異物が飛散しない ように局所排気のホースで覆って固定し、作業員が退避してからフラッシングを行うことを 繰り返した。Fig.付 B-6 のように、適宜放射線サーベイを行って汚染がないことを確認して から次の作業に進んだ。

以上の作業要領に従い、放射線安全セクション員の助言を得て、本作業を問題なく完了するこ とができた。



Fig.付 B-4 開先作業フロー



Fig.付 B-5 溶接作業フロー





This is a blank page.

_

表 1. SI 基本単位								
甘大昌	SI 基本単位							
本平里	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	Α						
熱力学温度	ケルビン	Κ						
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
AI 立 是 SI 組 立 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 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
比体積 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 ⁸
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	t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

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m ² kg 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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{-2} A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
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	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。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。
 (h)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。
 (a)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)へルツは周期現象についてのみ、ペラ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。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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CIPM物告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

	S	[組立単位	
組立量	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
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎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	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語								
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号			
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d			
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с			
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m			
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ			
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n			
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р			
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f			
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а			
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z			
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v			

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=60 s							
時	h	1 h =60 min=3600 s							
日	d	1 d=24 h=86 400 s							
度	۰	1°=(π/180) rad							
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad							
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad							
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²							
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³							
トン	t	$1 t=10^3 kg$							

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									
3	名称		記号	SI 単位で表される数値					
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J					
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg					
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da					
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×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	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な間径は
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	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
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹
(a) 3 元系のCGS単位系	とSIではi	直接比較できないため、等号「 🌢 」

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	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	-	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
/3	Ц		9			(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$