JAEA-Research 2016-021 DOI:10.11484/jaea-research-2016-021



「もんじゅ」の原子炉格納容器全体漏えい率試験に対する 代替露点検出器の実証試験

Verification of Alternative Dew Point Hygrometer for CV-LRT in MONJU

市川 正一 千葉 悠介	大野 史靖	羽鳥 雅一
小林 孝典 上倉 亮一	走利 信男	犬塚 泰輔
北野 寛 阿部 恒		

Shoichi ICHIKAWA, Yusuke CHIBA, Fumiyasu OHNO, Masakazu HATORI Takanori KOBAYASHI, Ryoichi UEKURA, Nobuo HASHIRI, Taisuke INUZUKA Hiroshi KITANO and Hisashi ABE

> 高速研究開発部門 高速増殖原型炉もんじゅ プラント保全部

Plant Maintenance Engineering Department Prototype Fast Breeder Reactor Monju Sector of Fast Reactor Research and Development

February 2017

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>http://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, 2017

「もんじゅ」の原子炉格納容器全体漏えい率試験に対する代替露点検出器の実証試験

日本原子力研究開発機構

高速研究開発部門 高速増殖原型炉もんじゅ プラント保全部

市川 正一,千葉 悠介,大野 史靖,羽鳥 雅一,小林 孝典,上倉 亮一,走利 信男*¹, 大塚 泰輔*¹,北野 寛*²,阿部 恒*²

(2016年11月24日受理)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構は,現在,原子炉格納容器全体漏えい率試験で用い ている塩化リチウム式露点検出器のメンテナンス等による高速増殖原型炉「もんじゅ」のプラン ト工程への影響を低減するため,塩化リチウム式露点検出器の代替品として,静電容量式露点検 出器の検証試験を実施した。検証試験として,原子炉格納容器全体漏えい率試験における静電容 量式露点検出器と既設の塩化リチウム式露点検出器との比較検証試験,また,他に類を見ない試 みとして,原子炉格納容器内にて2年間にわたる長期間,静電容量式露点検出器の性能評価に資 する長期検証試験が行われた。

原子炉格納容器全体漏えい率試験(試験条件:窒素雰囲気,24時間)における静電容量式露点 検出器の測定結果は,既設の塩化リチウム式検出器と比較して有意な差は無かった。また,長期 検証試験(試験条件:空気雰囲気,2年間)においては,静電容量式露点検出器は,高精度鏡面 式露点検出器との比較の結果,「電気技術規程(原子力編)」の「原子炉格納容器の漏えい率試験 規程」に基づく使用前検査時に要求される機器精度(検出器・変換器との合成精度:±2.04℃)を 長期間にわたり有することを確認した。

以上のことから,静電容量式露点検出器は,既存の塩化リチウム式検出器の代替露点検出器と して使用可能であり,かつ,メンテナンスによる高速増殖原型炉「もんじゅ」のプラント工程へ の影響がなく,また,長期間の運用が可能である露点検出器であることを確認した。

高速増殖原型炉もんじゅ:〒919-1279 福井県敦賀市白木2丁目1番地

*1 三菱重工業株式会社

*2 国立研究開発法人 産業技術総合研究所

JAEA-Research 2016-021

Verification of Alternative Dew Point Hygrometer for CV-LRT in MONJU

Shoichi ICHIKAWA, Yusuke CHIBA, Fumiyasu OHNO, Masakazu HATORI, Takanori KOBAYASHI, Ryoichi UEKURA, Nobuo HASHIRI^{*1}, Taisuke INUZUKA^{*1}, Hiroshi KITANO^{*2} and Hisashi ABE^{*2}

Plant Maintenance Engineering Department Prototype Fast Breeder Reactor Monju Sector of Fast Reactor Research and Development Japan Atomic Energy Agency Tsuruga-shi, Fukui-ken

(Received November 24, 2016)

To reduce the influence of maintenance of dew point hygrometer on the plant schedule at the prototype fast breeder reactor MONJU, Japan Atomic Energy Agency examined a capacitance-type dew point hygrometer as an alternative to the lithium-chloride dew point hygrometer being used in the containment vessel leak rate test. As verifications, a capacitance-type dew point hygrometer was compared with a lithium-chloride dew point hygrometer under a containment vessel leak rate test condition. And the capacitance-type dew point hygrometer was compared with a high-precision-mirror-surface dew point hygrometer for long-term (2 years) in the containment vessel as an unprecedented try.

A comparison of a capacitance-type dew point hygrometer with a lithium-chloride dew point hygrometer in a containment vessel leak rate test (Atmosphere: nitrogen, Testing time: 24 h) revealed no significant difference between the capacitance-type dew point hygrometer and the lithium-chloride dew point hygrometer. A comparison of the capacitance-type dew point hygrometer with the high-precision-mirrorsurface dew point hygrometer for long-term verification (Atmosphere: air, Testing time: 24 months) revealed that the capacitance-type dew point hygrometer satisfied the instrument specification (synthesized precision of detector and converter: $\pm 2.04^{\circ}$ C) specified in the Leak Rate Test Regulations for containment vessel.

It was confirmed that the capacitance-type dew point hygrometer can be used as a long-term alternative to the lithium-chloride dew point hygrometer without affecting the dew point hygrometer maintenance schedule of the MONJU plant.

Keywords: MONJU, CV-LRT, Dew Point Hygrometer, Capacitance, Lithium-chloride,

High-precision-mirror-surface, Maintenance Periods

*1 Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

*2 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

目 次

1.	. 序論	1
2.	- 「もんじゅ」, CV-LRT 及び露点検出器の概要	2
	2.1 高速増殖原型炉「もんじゅ」	2
	2.2 CV-LRT	3
	2.3 露点検出器	4
	2.3.1 塩化リチウム式露点検出器の概要	4
	2.3.2 塩化リチウム式露点検出器の問題点	5
3.	代替露点検出器の選定	6
	3.1 JEAC4203 で要求されている計器仕様	6
	3.2 代替露点検出器の校正管理	7
	3.3 代替露点検出器の選定	7
	3.4 代替露点検出器の原子炉施設における使用実績	7
	- N 1996 - L. N.I.	
4.	. 試験万法	9
4.	- 試験方法 4.1 CV-LRT 条件下における検証試験の方法	9 9
4.	 試験方法 4.1 CV-LRT 条件下における検証試験の方法 4.2 長期検証試験の方法 	9 9 12
 4. 5. 	 試験方法 4.1 CV-LRT 条件下における検証試験の方法 4.2 長期検証試験の方法 試験結果 	9 9 12 16
4.	 試験方法 4.1 CV-LRT 条件下における検証試験の方法 4.2 長期検証試験の方法 試験結果 5.1 CV-LRT 条件下における検証試験の結果 	9 9 12 16 16
4.	 試験方法 4.1 CV-LRT 条件下における検証試験の方法	9 9 12 16 16 17
4.5.6.	 試験方法 4.1 CV-LRT 条件下における検証試験の方法	9 9 12 16 16 17 28
 4. 5. 6. 	 試験方法	9 9 12 16 16 17 28 28
4.5.6.	 試験方法. 4.1 CV-LRT 条件下における検証試験の方法	9 9 12 16 16 17 28 28 30
 4. 5. 6. 7. 	 試験方法 4.1 CV-LRT 条件下における検証試験の方法	9 12 16 16 17 28 28 30 32
 4. 5. 6. 7. 謝 	 試験方法	9 12 16 16 17 28 28 30 32 32

Contents

1.	Intro	oduction 1
2.	Out	line of MONJU, CV-LRT and dew point hygrometer 2
	2.1	Prototype fast breeder reactor MONJU
	2.2	CV-LRT
	2.3	Dew point hygrometer
	2	2.3.1 Measurement principle of lithium chloride-type dew point hygrometer
	2	2.3.2 Problems of lithium chloride-type dew point hygrometer
3.	Scre	eening of alternative dew point hygrometer
	3.1	Instrument specification to measure dew point required by JEAC
	3.2	Proofreading management for alternative dew point hygrometer
	3.3	Selection of alternative dew point hygrometer
	3.4	Use results of alternative dew point hygrometer in nuclear reactor facilities
4.	Exp	erimental procedure
	4.1	Verification examination under CV-LRT condition
	4.2	Long-term verification examination under usual condition
5.	Res	ults
	5.1	Verification examination results under CV-LRT condition
	5.2	Long-term verification examination results under usual condition
6.	Disc	cussion
	6.1	Discussion of verification examination under CV-LRT condition
	6.2	Discussion of long-term verification examination under usual condition
7.	Con	aclusions
Ac	knov	wledgements
Re	ferer	nces

表リスト

Table 1	JEAC4203-2008 における原子炉格納容器全体漏えい率試験用標準計器仕様	. 6
Table 2	JEAC4203-2008の計器仕様と国内外代表的な露点検出器の仕様との比較	. 7
Table 3	「もんじゅ」におけるヴァイサラ社製湿度検出器の使用状況	. 8
Table 4	CV-LRT 条件下の検証試験における試験条件、計器仕様及び計器校正	10
Table 5	長期検証試験における試験条件,計器仕様及び計器校正	15
Table 6	静電容量式露点検出器の校正結果	16
Table 7	静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と	
	高精度鏡面式露点検出器との出力比較(平均値)	17
Table 8	静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と	
	高精度鏡面式露点検出器との偏差	18
Table 9	高精度鏡面式露点検出器のホース長さが各露点検出器に与える影響	25
Table 10	「もんじゅ」各場所の環境条件の比較	26
Table 11	静電容量式露点検出器の最終試験(24ヶ月)後の校正結果	27
Table 12	高精度鏡面式露点検出器の最終試験(24ヶ月)前後の校正結果	27

図リスト

Fig.1	「もんじゅ」の概要2
Fig.2	「もんじゅ」における CV-LRT 概要図3
Fig.3	塩化リチウム式露点検出器の構造(横河電子機器株式会社製 E-771)4
Fig.4	静電容量式露点検出器の構造(ヴァイサラ社製 DMT242)8
Fig.5	CV-LRT における計器配置図11
Fig.6	長期検証試験における各露点検出器の設置場所12
Fig.7	高精度鏡面式露点検出器のシステム構成13
Fig.8	計器設置位置関係図13
Fig.9	CV-LRT 条件下における検証試験結果16
Fig.10	静電容量式露点検出器と塩化リチウム式露点検出器と
	高精度鏡面式露点検出器との比較(平均値)18
Fig.11	静電容量式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との比較(2012.5.15-16)19
Fig.12	静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と
	高精度鏡面式露点検出器との比較(2012.8.22-23)19
Fig.13	静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と
	高精度鏡面式露点検出器との比較(2012.11.20-21)
Fig.14	静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と
	高精度鏡面式露点検出器との比較(2013.5.29-30)

Fig.15	静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と
	高精度鏡面式露点検出器との比較(2013.7.31-8.1)
Fig.16	静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と
	高精度鏡面式露点検出器との比較(2013.9.25-26)
Fig.17	静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と
	高精度鏡面式露点検出器との比較(2014.1.22-23)
Fig.18	静電容量式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との偏差(2012.5.15-16)23
Fig.19	静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と
	高精度鏡面式露点検出器との偏差(2012.11.20-21)
Fig.20	静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と
	高精度鏡面式露点検出器との偏差(2013.5.29-30)
Fig.21	静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と
	高精度鏡面式露点検出器との偏差(2013.9.25-26)
Fig.22	高精度鏡面式露点検出器のホース長さが各露点検出器に与える影響
Fig.23	CV-LRT における原子炉格納容器内の温度変化
Fig.24	CV-LRT における原子炉格納容器内の水蒸気分圧の変化

1. 序論

高速増殖原型炉「もんじゅ」(以下,「もんじゅ」という。)では,原子炉格納容器全体漏えい率 試験(以下, CV-LRT という。)に用いる露点検出器として,塩化リチウム式露点検出器(横河 電子機器株式会社製)が使用されている。塩化リチウム式露点検出器は,同検出器の感湿部に塗 布する塩化リチウム溶液の塗布後の有効期限(3~6ヶ月/メーカー推奨)があるため,プラント 運転工程が制約されるという問題がある。具体的には,「もんじゅ」では、1次冷却系ナトリウム 充填時には当該機器設置エリアの一部が窒素雰囲気となり作業員が立ち入ることができず,塩化 リチウム式露点検出器のメンテナンスを行う為には一旦ナトリウムをドレンし空気雰囲気にする 作業が必要となる。また,塩化リチウム塗布有効期限の制約上,CV-LRT 実施前6ヶ月の間に窒 素雰囲気室を空気雰囲気室に置換する必要がある。これらにより塩化リチウム式露点検出器の使 用はプラント運転工程に影響を与える可能性がある。そこで国立研究開発法人日本原子力研究開 発機構(以下,原子力機構という。)の高速増殖原型炉もんじゅプラント保全部(以下,もんじゅ プラント保全部という。)では,プラント運転工程への影響を最小に抑えるため,塩化リチウム塗 布の必要がない代替露点検出器を検討した。

もんじゅプラント保全部は、「電気技術規程(原子力編)」の「原子炉格納容器の漏えい率試験 規程」^{[1][2]}(以下,JEAC4203-2008という。)に基づく使用前検査時に要求される計器の仕様要求、 および計量法^[3]に基づく計量法トレーサビリティ制度(Japan Calibration Service System: JCSS)認 定の校正証明書の発行に対応できる露点計を代替露点検出器として選考し、窒素雰囲気である CV-LRT 条件下において代替露点検出器と塩化リチウム式露点検出器との性能確認を実施した。 また、露点検出器にとっては窒素雰囲気よりも負荷の大きい大気雰囲気おいて、長期間にわたっ て露点検出器の性能を維持できるかを評価するため、他に類を見ない試みとして、「もんじゅ」原 子炉格納容器内において、代替露点検出器の2年間継続測定を実施し、一定期間ごとに基準器の 高精度鏡面式露点検出器と比較する長期検証試験を実施した。

2. 「もんじゅ」, CV-LRT 及び露点検出器の概要

2.1 高速増殖原型炉「もんじゅ」

「もんじゅ」は、わが国の高速増殖炉実用化の技術基盤を確立するため、原子力機構を中心に 自主開発しているプルトニウム・ウラン混合酸化物燃料、ナトリウム冷却、電気出力 280MW の 高速増殖原型炉であり、1 次ナトリウム冷却系、2 次ナトリウム冷却系補助冷却設備、水・蒸気タ ービン設備及び補機冷却設備といった各々が独立した3 系統を持ち、A ループ、B ループ及び C ループの3 ループを持つループ型炉の発電プラントである。Fig.1 に「もんじゅ」の概要を示す。 炉心で発生した 714MW の熱は、1 次ナトリウム冷却材(1 ループ当たりの流量は 5,100t/h、×3 ループ)で熱輸送され、中間熱交換器を介して非放射性の 2 次ナトリウム冷却材(1 ループ当た りの流量 3,700t/h、×3 ループ)に伝達される。この熱はさらに蒸気発生器(ヘリカルコイル貫流 式分離型)で 2 次ナトリウム冷却材から水・蒸気への熱交換を行い、ここで発生した蒸気(温度 483℃、圧力 12.5MPa(127kg/cm²)、3 ループ合計の全蒸気量約 1,100t/h)で発電機の蒸気タービン を駆動し発電する。このようにして、原子炉で発生した熱エネルギーは、約 40%の効率で 280MW の電気エネルギーに変換され、275kV の送電系へ送り出される。





Fig.1 「もんじゅ」の概要

2.2 CV-LRT

Fig.2 に「もんじゅ」における CV-LRT の概要図を示す。原子炉格納容器は、事故時に原子炉からの放射性物質の放出を防止するため(放射性物質を「閉じ込める」機能)、高度な気密性が求められる。このため、使用前検査には原子炉格納容器の気密性を確認する試験である CV-LRT がJEAC4203-2008 に準じて実施される(高速増殖炉研究開発センター原子炉設置許可申請書(高速増殖原型炉もんじゅ原子炉施設)添付書類 八の「7.2.6.1 原子炉格納容器漏えい試験」を参考)。 CV-LRT では、試験時に作動する系統設備機器を除いて原子炉格納容器を貫通するすべてのガス系統を遮断し、原子炉格納容器内を窒素で加圧(54kPa/max)保持し、温度、湿度及び圧力等のデータを採取し、試験中に漏えいするガス量(平均漏えい率(%/day))を計算することによって、原子炉格納容器の気密性を確認する。



Fig.2 「もんじゅ」における CV-LRT の概要図

2.3 露点検出器

CV-LRT 中は、外気温の変化、換気空調系ファンの動作等により、原子炉格納容器内の温度は 常に変化し続ける。この変化により、原子炉格納容器内にある結露水分などが蒸発して気体にな り、原子炉格納容器内の圧力が変化する。平均漏えい率(%/day)を求めるためには窒素中の水 蒸気分圧の変化による影響を無視できない。そこで露点温度を求めることによって水蒸気分圧分 を補正し、平均漏えい率(%/day)を算出することが可能になる。

2.3.1 塩化リチウム式露点検出器の概要

Fig.3 に「もんじゅ」の CV-LRT で原子炉格納容器内の露点温度(水蒸気分圧)計測に使用して いる塩化リチウム式露点検出器の構造・原理を示す。塩化リチウム式露点検出器の感湿部は,焼 結金属製の保護管になっており,保護管はグラスウールで覆われ,その上に一対の加熱用電極線 ヒーターが螺旋状に巻き付けられ,更に塩化リチウム(LiCl)の水溶液が塗布されている。塩化 リチウム水溶液は吸湿性が非常に高く,一定温度下では湿度が高いほど多くの水分を吸収して, 溶液濃度が薄くなる。ヒーター線に交流電流が通じるとその熱により溶液の温度が上昇し、塗布 液の水分が蒸発して,ある温度になると乾燥状態となってヒーター電流が殆ど通じなくなる。こ のとき,塩化リチウム膜の水蒸気圧が周囲の気体の水蒸気分圧と等しくなる温度で平衡する。保 護管の内部には測温抵抗体が挿入されているので,これで平衡に達したときの温度を測定してい る。すなわち,塗布膜の温度から水蒸気圧,従って露点温度が計測できる。なお、塩化リチウム 水溶液は腐食性が大きいため、ヒーター線には通常、金線または金メッキが施された銀線が用い られる。



Fig.3 塩化リチウム式露点検出器の構造(横河電子機器株式会社製 E-771)

2.3.2 塩化リチウム式露点検出器の問題点

塩化リチウム式露点検出器を使用するに当たっての問題点としては,塗布する塩化リチウム溶 液に塗布後の有効期限があり,これにより「もんじゅ」のプラント運転工程が制約される。

塩化リチウムの有効期限は、使用環境により異なるが 3~6 ヶ月程度である(メーカー推奨)。このため、「もんじゅ」を含め PWR プラントにおいては、塩化リチウム溶液の塗布期限を、安全側の設定で 3 ヶ月としている。

さらに、「もんじゅ」は軽水炉と異なり、ナトリウム充填時、原子炉格納容器内の1次系ナトリ ウム機器の設置エリアが窒素雰囲気であるため、作業員は立ち入ることができない。このため、 塩化リチウムの塗布作業に際しては、プラント点検のために1次冷却系ナトリウムをドレンし、 空気置換する時に併せて行う必要があるなど、制約がある。

3. 代替露点検出器の選定

3.1 JEAC4203 で要求されている計器仕様

JEAC4203-2008 の「3.1.3.2 試験用計器および測定精度」において,露点検出器の測定範囲および精度に関する計器仕様が「表 3.1.1」に示されている。Table 1 に「表 3.1.1」の抜粋を示す。本項において,なお書きで「表 3.1.1 の仕様と同等以上の性能を有する測定器としてもよい。」とあることから,現状では軽水炉を含めた原子力関連の CV-LRT で使用する露点検出器は塩化リチウム式露点検出器のみの仕様であるが,JEAC4203-2008 上では,計器仕様を満足すれば,他の検出器を用いることができる。

なお、「もんじゅ」における使用前検査上の露点検出器の取扱いについては、2009 年 12 月に実施した CV-LRT 使用前検査要領書において、「検査用測定機器一覧表」に露点検出器の測定範囲および測定精度を記載し、その測定範囲および測定精度として JEAC4203-2008 の計器仕様を記載し、 *書きとして JEAC と同様に「*上記の測定機器と同等以上の測定範囲および測定精度の測定機器を使用する。」とすることで、他の検出器の仕様も妨げない記載としている。

本試験を実施するにあたり,国内外にて製造されている露点検出器の検出方法が異なる代表的な 機種を選定し,JEAC4203-2008にある計器仕様との比較を行った。その結果を Table 2 に示す。な お、当該表中の JCSS 校正証明書発行可否に関しては、2012 年 5 月の調査時点のものである。

調査の結果,塩化リチウム式露検出器以外を製造している代表的な会社に関しては,国内には殆 ど無く,海外では,アメリカ合衆国の GE センシング&インスペクション・テクノロジーズ株式 会社,フィンランド共和国のヴァイサラ株式会社であることから,その代表的な機種を選定した。 塩化リチウム式露点検出器以外の代替露点検出器の候補としては,GE センシング&インスペクシ ョン・テクノロジーズ株式会社製およびヴァイサラ社製の静電容量式の露点検出器が JEAC4203-2008の計器仕様を満足することを確認した。

測定項目	測定機器	測定範囲	精度
大気圧	精密水銀気圧計	870~1100hPa[abs]	±0. 05hPa
百乙后按纳索黑中压力	精密水銀マノメータ	0~3340hPa[gage]	±2. 0hPa
原于炉格納谷器内圧力	精密圧力計	0~500kPa[gage]	±0.2% of F.S.
原子炉格納容器内絶対圧力	クオーツマノメータ	0~6500hPa[abs]	± (0.01% of F.S. + 1digit)
原子炉格納容器内温度	温度検出器	0∼50°C	±(0.15+0.002x t)℃ t:温度 [℃]
百乙后故幼家黑山雪占	露点検出器	-30 ~ 50°C	±2.0°C
尿丁炉馆砌合菇内路品	露点変換器	-30∼50°C	±0.5% of F.S.

Table 1 JEAC4203-2008 における原子炉格納容器全体漏えい率試験用標準計器仕様

	JEAC4203 要求計器仕様	GE センシング&イン スペクション・テク ノロジーズ株式会社 (米国)	ヴァイサラ (フィンランド)	GE センシング& インスペクショ ン・テクノロジ ーズ株式会社 (米国)	GE センシング&イン スペクション・テクノ ロジーズ株式会社 (米国)
検出方式	-	静電容量式 (酸化アルミニウム方式)	静電容量式 (高分子膜方式)	レーザー式	鏡面冷却式
型式	-	Mシリーズプローブ	DMT242B	DF750	D2
測定範囲	-30∼50°C	-110~20°C (Option ~60°C)	-60~60°C	-120~-60°C	-35~25°C
精度	±2.0°C	±2.0°C	±2.0°C	±3.0°C	±0.2°C
JCSS ^{*1} 校正証 明書発行可否 ^{*3}	_	否 ^{*3} NIST* ² 校正証明書のみ可	可 ^{*3} JCSS ^{*1} 登録事業者	否* ³	否*3

Table 2 JEAC4203-2008の計器仕様と国内外代表的な露点検出器の仕様との比較

*1 JCSS:計量法トレーサビリティ制度:Japan Calibration Service System

*1 NIST:アメリカ国立標準技術研究所:National Institute of Standards and Technology

*3 2012 年 5 月における調査時点

3.2 代替露点検出器の校正管理

CV-LRT に用いられる露点検出器は、使用前検査時に計器の校正管理(校正証明書)として、トレーサビリティが要求される。さらには、信頼性の高い校正を実施するためには、その露点検出器の詳細な技術内容に精通していること、校正時に場合によっては調整が必要となることから、メーカー自身による校正が必要である。そのため、代替露点検出器について、計量法トレーサビリティ制度である JCSS 認定の校正証明書の発行が可能かどうかの調査を実施した。

Table 2 に調査結果を示す。調査の結果, ヴァイサラ社は国内(東京)に校正部署があり, JCSS の登録事業者であることから, JCSS 認定の校正証明書が発行できることを確認した。GE センシング&インスペクション・テクノロジーズ株式会社については, アメリカ国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology: NIST)にて校正された校正証明書の発行のみで, JCSS 認定の校正証明書の発行はできないことを確認した。なお,本調査時(2012年5月)において, 国内の JCSS 登録事業者は7社であったが, 2016年10月現在の登録事業者数は13社となっている。

3.3 代替露点検出器の選定

3.1節, 3.2節における調査結果から、本試験に用いる代替露点検出器は、ヴァイサラ社製の静電 容量式露点検出器を選定した。

Fig.4 に静電容量式露点検出器の測定原理を示す。静電容量式露点検出器のセンサー部は保護フィルターに覆われている。保護フィルター内部は、ガラス基板に下部電極が敷設され、その上に 感湿性の高分子膜が塗布され、さらにその上には上部電極が敷設されたセンサー部が内蔵されて いる。露点温度は静電容量の変化より測定する。これは露点温度の変化に応じて高分子膜に含ま れる水分量が変化することで誘電率も変化し、静電容量が変化するためである。

3.4 代替露点検出器の原子炉施設における使用実績

3.3 節で選定したヴァイサラ社製の静電容量式露点検出器は、国内外での原子炉施設での使用実

績はない。しかし、静電容量式露点検出器と同様な検出方式である、ヴァイサラ社製の静電容量 式湿度検出器は、「もんじゅ」を含め国内外の原子炉施設にて一般空調設備の湿度管理に使用され ている。スウェーデン王国においては、核廃棄物処理の深層貯蔵に係る試作貯蔵場の湿度管理で 使用されている。「もんじゅ」においては、燃料取扱設備計算機室などの4ヶ所に当該湿度検出器 が設置されており、計器校正管理は、3サイクル(40ヶ月)で管理され、2011年に校正点検が行 われた際には、計器管理の誤差内(±2.0%)であったため、再調整の必要はなかった。なお、保 全計画制定前には、2001年に校正を行っており、約10年が経過した状態での計器校正を実施し た。結果として誤差は、-0.08~+1.2%であった。「もんじゅ」における使用状況を Table 3 に示す。

Table 3 「もんじゅ」におけるヴァイサラ社製湿度検出器の使用状況

No.	計器設置箇所	計器 No.	誤差(%RH)	点検日(前回点検日)
1	放射線管理室	673-ME001	-0. 08	2011/1/19 (2001/1/15)
2	燃料取替設備計算機室	687-ME011	0.4	2011/3/16 (2000/12/4)
3	中央計算機室	687-ME021	1.2	2011/3/11 (2000/12/5)
4	出入管理室	694-ME011	1.2	2011/3/4 (2000/12/11)



Fig.4 静電容量式露点検出器の構造(ヴァイサラ社製DMT242)

4. 試験方法

4.1 CV-LRT 条件下における検証試験の方法

本試験では、CV-LRT 条件下における代替露点検出器の静電容量式露点検出器と本設の塩化リチ ウム式露点検出器との指示値の差異を確認するため、2009 年度の CV-LRT 時(12月2日12:00 から翌3日12:00)において、本設の塩化リチウム式露点検出器20台と共に、2台の静電容量式 露点検出器を原子炉格納容器内の床上(海抜43m付近)に設置し、検証試験を行った。Fig.5に 2009 年実施の CV-LRT における機器配置図を示す。塩化リチウム式露点検出器の20台に関して は、JEAC4203-2008 に基づき、温度測定位置に準じた位置に配置した。静電容量式露点検出器2 台に関しては、海抜43m付近の塩化リチウム式露点検出器(Fig.5のD20に配置)近傍に設置し た。本試験においては、データを1時間毎に計25回取得した。

また,試験後に静電容量式露点検出器の計器校正をメーカー工場にて行い,計器精度が JEAC4203-2008の計器精度(検出器と変換器の合成精度:±2.04℃*)内にあることの確認を行った。

* Table 1 より検出器精度(±2.0℃)と変換器精度(±0.5% of F.S.(-30~+50℃))の合成精度は以下の通りとなる。

 $\pm \sqrt{(2.0)^2 + (0.4)^2} = \pm 2.04^{\circ}$ C

(1) 試験条件

Table 4 に試験条件を示す。CV-LRT 時において原子炉格納容器内床上に静電容量式露点検出器 を設置後,原子炉格納容器床上を窒素雰囲気に置換し,窒素雰囲気の原子炉格納容器内床下と導 通させ,試験圧力まで昇圧した(+54 kPa / max)。CV-LRTの試験概要,手順に関しては,2.2節及 び Fig.2 を参照のこと。

なお,原子炉格納容器内は,通常時は空調設備にて温度,湿度管理が行われているため,水分, 塩分,高湿度による結露・塵埃の影響が小さい環境条件であり,さらに,屋外設置環境に比べて 温度の変化が小さく(20~25℃),温度依存性に係る検出性能の劣化は小さい状況にある。

(2) 計器仕様

Table 4 に計器及び記録装置の仕様を示す。本試験では、ヴァイサラ社製の静電容量式露点検出器(型式:DMT242B,計測範囲:-60~60 °C,システム精度:±2.0°C)2台,横河電子機器株式会社製の塩化リチウム式露点検出器(システム構成:検出器 + 信号変換器,型式:E-773,計測範囲:-40~60°C,検出器単体システム精度:±0.5°C,変換器単体システム精度:±0.5%)20 台を用いた。

また,静電容量式露点検出器・塩化リチウム式露点検出器用データロガーとしてグラフテック社 製のデータロガー(型式:GL800,サンプリング間隔:最少100 ms,測定精度:±0.1% of F.S.(電 圧))を用いた。 (3) 計器校正

Table 4 に静電容量式露点検出器の計器校正条件を示す。静電容量式露点検出器の計器校正は, 試験前後にヴァイサラ社製の露点検出器校正システムにて,恒温室での標準ガスによる表面弾性 波式露点検出器との比較校正によって実施された。

Table 4 CV-LRT 条件下の検証試験における試験条件、計器仕様及び計器校正

試験条件				
雰囲気		N ₂		
圧力		+54kPa/maximum		
温度		20~25°C		
試験期間		24 時間		
測定間隔		1時間毎		
	計器仕様			
検出方式	静電容量式	塩化リチウム式		
型式	DMT242B	E-773		
計器個数	2 (検出器 A, B)	20		
メーカー	ヴァイサラ社	横河電子機器株式会社		
測定範囲	-60~60°C	-40∼60°C		
検出器精度	±2.0°C	±0.5°C		
変換器精度	—	$\pm 0.5\%$ of F.S. (-30~50°C)		
記録装置仕様				
型式	GL800	同左		
メーカー	グラフテック社	同左		
サンプリング間隔	100ms/minimum	同左		
精度	\pm 0.1% of F.S. (voltage)	同左		
	計器校正			
校正周期	1 年間	-		
標準器	表面弾性波式露点検出器			
	(トレーサビリティ可)	-		
	(ヴァイサラ社製)			
公的認定機関	JCSS	_		
校正場所	ヴァイサラ社工場(日本)	_		
校正試験要領	恒温室での標準ガスによる表面弾性波式露点検	_		
	出器の比較校正			



Fig.5 CV-LRT における計器配置図

4.2 長期検証試験の方法

静電容量式露点検出器の長期運用による性能を確認するため、「もんじゅ」原子炉格納容器内床上の大気雰囲気にて2年間(24ヶ月)、静電容量式露点検出器を継続して測定した。また、参考値取得として本設の塩化リチウム式露点検出器も継続測定に供した。静電容量式露点検出器の計測データが妥当であるかを確認するため、各測定月毎(0,3,6,12,14,16,20及び24ヶ月)に高精度鏡面式露点検出器を設置し、これを基準にして比較を行い、被試験体の静電容量式露点検出器と基準器の高精度鏡面式露点検出器のそれぞれの測定データの差がJEAC4203-2008の計器の精度要求(検出器と変換器の合成精度:±2.04℃)内にあるか確認を行った。Fig.6に原子炉格納容器内の各露点検出器設置場所を示す。なお、基準となる高精度鏡面式露点検出器の精度は、JEAC4203-2008の計器の精度要求(検出器と変換器の合成精度:±2.04℃)より約1桁精度が高い露点検出器で比較検証試験前後に必ず計器校正を実施した。高精度鏡面式露点検出器のシステム構成をFig.7に示す。また、静電容量式露点検出器、塩化リチウム式露点検出器及び高精度鏡面式 露点検出器の設置位置関係をFig.8に示す。

なお,高精度鏡面式露点検出器については,吸気ライン長さが高精度鏡面式露点検出器の出力に 影響を与えている可能性がある。そこで吸気ラインホース長さによる高精度鏡面式露点検出器へ の影響を評価するため,所定の測定が完了した後に高精度鏡面式露点検出器の吸気ラインを取り 外し,静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器及び高精度鏡面式露点検出器の各露点 検出器の測定を継続して実施した。

本試験を空気雰囲気の原子炉格納容器内床上で実施するにあたっては,窒素雰囲気の CV-LRT 時に比べると,露点検出器の劣化の観点から,より厳しい環境条件であることが考えられる。そ こで,当該環境における劣化要因について,日本工業規格 JIS Z 8806「湿度-測定方法」^[4]の「10.1.3 高分子電気容量式湿度計」の「d 取扱い方法および注意事項」より,露点温度,環境温度,環境 湿度,塵埃状況及び塩分濃度の5点を抽出した。これらの劣化要因を原子炉格納容器内の床上(空 気雰囲気),床下(窒素雰囲気)について,気象庁データ,過去の CV-LRT データ及び過去の塩化 リチウム式露点検出器データを用いて比較した。









Fig.8 計器設置位置関係図

(1) 試験条件

Table 5 に試験条件を示す。本試験では、「もんじゅ」原子炉格納容器内床上に静電容量式露点検 出器を設置し、空気雰囲気で実施した。なお、「もんじゅ」原子炉格納容器内床下(Fig.5 の 1 次 主冷却室等)での試験は、当該区域が窒素雰囲気であるため、試験を実施するにあたり空気置換、 窒素置換の実施、主系統のナトリウムドレンの実施など、プラント管理工程に影響を与えるため、 除外した。

なお,原子炉格納容器内は,通常時は空調設備にて温度,湿度管理が行われているため,水分, 塩分,高湿度による結露・塵埃の影響が小さい環境条件であり,さらに,屋外設置環境に比べて 温度の変化が小さく(20~25 ℃),温度依存性に係る検出器の劣化は小さい状況にある。

(2) 計器仕様

Table 5 に計器及び記録装置の仕様を示す。本試験では、ヴァイサラ社製の静電容量式露点検出 器(型式:DMT242B,計測範囲:-60~60 ℃,システム精度:±2.0℃)3台,横河電子機器株式 会社製の塩化リチウム式露点検出器(システム構成:検出器 + 信号変換器,型式:E-773,計測 範囲:-40~60 ℃,検出器単体システム精度:±0.5℃,変換器単体システム精度:±0.5%)1台及 び神栄テクノロジー株式会社製の高精度鏡面式露点検出器(型式:DewStar S-1,計測範囲:-35~ 50 ℃,システム精度:±0.2 ℃,サンプリング流量:0.5~2.5 L/min)1台を用いた。

また,静電容量式露点検出器・塩化リチウム式露点検出器用データロガーとして日置電機株式会 社製のデータロガー(型式:メモリハイロガー8430,サンプリング間隔:最少10 ms,測定精度: ±0.1 % of F.S. (電圧)),高精度鏡面式露点検出器用データロガーとしてグラフテック社製のデー タロガー(型式:GL820,サンプリング間隔:最少10 ms,測定精度:±0.1 % of F.S. (電圧))を 用いた。

(3) 計器校正

静電容量式露点検出器の計器校正は、0、3、6、12、14、16、20、24 ヶ月の測定実施月のうち 最終測定月(24ヶ月)後に、ヴァイサラ社製の露点検出器校正システムにて、恒温室での標準ガ スによる表面弾性波式露点検出器の比較校正によって実施した。

なお,基準器となる高精度鏡面式露点検出器の計器校正は,各測定月の試験前後に,分流式湿 度発生装置により発生させた試料空気を,被校正露点検出器及び標準器(GE センシング&インス ペクション・テクノロジーズ株式会社製の鏡面式露点検出器)に同時に導入し,比較校正によっ て実施した。

Table 5長期検証試験における試験条件、計器仕様及び計器校正

試験条件					
雰囲気			空気		
圧力				大気圧	
温度			2	0∼25°C	
試験期間			2 年間	罰(24 ヶ月)	
測定時間/測定実施月			24 時間継続/0, 3, 6	, 12, 14, 16, 20, 24ヶ月	
		計器	仕様		
検出方式	静電容量式		塩化リチウム式	高精度鏡面式	
型式	DMT242B		E-773	DewStar S-1	
計器個数	3 (CH1, CH2, CH3)		1	1	
メーカー	ヴァイサラ社		横河電子機器株式会社	神栄テクノロジー株式会社	
測定範囲	-60~60°C		-40 ~ 60°C	-35 ~ 50°C	
検出器精度	±2.0°C		±0.5°C	±0. 2°C	
変換器精度	—	±(0.5% of F.S. (-30∼50°C)	_	
	Ē	記録装	置仕様	·	
型式	メモリハイロガー 8430		同左	GL820	
メーカー	日置電機株式会社	同左		グラフテック社	
測定間隔	10ms/minimum		同左	10ms/minimum	
精度 ±0.1% of F.S. (voltage)			同左	$\pm 0.1\%$ of F.S. (voltage)	
		計器	校正		
校正期間	1 年間		_	6ヶ月	
標準器	表面弾性波式露点検出器			鏡面式露点検出器	
	(トレーサビリティ可)			(トレーサビリティ可)	
	(ヴァイサラ社製)		—	(GE センシング&インスペクショ	
				ン・テクノロジーズ株式会社製)	
公的認定機関	JCSS		_	JCSS	
校正場所	ヴァイサラ社工場(日本)		_	神栄テクノロジー株式会社	
校正方法	恒温室での標準ガスによ			分流式湿度発生装置により発生	
	る表面弾性波式露点検出			させた試料空気を被校正露点検	
	器との比較校正。		_	出器に導入して測定。	
				校正結果同時に測定した標準露	
				点検出器との比較校正により求	
				める。	

5. 試験結果

5.1 CV-LRT 条件下における検証試験の結果

Fig.9 に静電容量式露点検出器の検出器 A, B, 塩化リチウム式露点検出器の 20 台(平均値)及び床上に設置した検出器 ME-20 (Fig.5 の D20 に配置された検出器), それぞれの露点温度の経時変化を示す。

塩化リチウム式露点検出器に関しては、平均値及び検出器 ME-20 は、時間経過に伴い増加傾向 を示すとともに、両者の指示値の差が若干増加する傾向を示した。

静電容量式露点検出器に関しては、検出器 A 及び検出器 B の指示値に有意な差は見られなかった。また、検出器 A, B の指示値は、同じ設置場所の検出器 ME-20 の指示値と同様、時間経過に伴い増加傾向を示し、検出器 ME-20 の指示値より若干低い値を示した。しかし、検出器 A, B と検出器 ME-20 の指示値の差は最大でも約 0.5 ℃であった。

静電容量式露点検出器の校正結果を Table 6 に示す。CV-LRT 前後の校正結果の誤差(最大値)は 最大 0.5 $^{\circ}$ Cであり、メーカー精度($\pm 2^{\circ}$)の 1/4 にあたる高い精度を維持していた。



Fig.9 CV-LRT 条件下における検証試験結果

標準器 [℃]	CV-LRT 前	(2009. 11. 13)	CV-LRT後(2009.1.27)		(2009. 1. 27)
	A [°C]	B [°C]	候华岙 [0]	A [°C]	B [°C]
-10	-10	-10	-11.8	-11.8	-11.9
-6.4	-6.5	-6.5	-7	-7	-7. 3
0	-0. 1	-0. 2	0.9	0. 8	0.4

Table 6 静電容量式露点検出器の校正結果

5.2 長期検証試験の結果

(1) 静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との比較 静電容量式露点検出器 CH1, CH2, CH3 の 3 台,参考値取得として設置した塩化リチウム式露 点検出器1台及び基準器の高精度鏡面式露点検出器1台の数ヶ月毎の測定に関して,Table 7,Fig.10 に平均測定値を示すとともに,Fig.11~17 に測定値を示す。また,各測定月における高精度鏡面 式露点検出器に対する静電容量式露点検出器及び塩化リチウム式露点検出器の偏差に関して, Table 8 に平均値における偏差を示すとともに,Fig.18~21 に代表的な測定月の測定値の偏差を示 す。なお,Table 8 には 2 回目 (3ヶ月測定)測定時等で見られた指示値の乱れ(原子炉格納容器 内のプラント関連作業による影響)を除外した瞬間値の偏差も記した。また,参考値取得として 長期検証試験に供した塩化リチウム式露点検出器は,機器調達の都合により初回測定を実施して いない。塩化リチウムの有効期限の観点から,2回目測定から機器を供しても,初回,2回目と継 続計測した場合との有意な差異は無いと判断した。

静電容量式露点検出器 CH1, CH2 は, Table 7, Fig.10 に示す平均測定値において,塩化リチウム式露点検出器ともに,基準器の高精度鏡面式露点検出器とほぼ同一の値を取り, Table 8 に示す高精度鏡面式露点検出器に対する偏差も約±0.4℃以内と僅かであった。また, Fig.11~17 に示す各測定月の測定値からは,これらの機器が定性的に同様の傾向を示していた。

一方,静電容量式露点検出器 CH3 に関しては,Table 7, Fig.10 において平均測定値が他の露点 検出器に比べ低く,Table 8 において平均測定値における偏差が最大-1.23℃と CH1, CH2 よりも大 きかった。Fig.11~17 に示す各測定月の測定値は定性的に同様の傾向であるものの,Fig.11,13, 18~21 において CH3 の指示値は一時的に減少し,それに伴う偏差の拡大が見られた。特に初回、 3 回目 (6 ヶ月測定)において顕著に見られた。

中間	露点(平均値) [℃]						
h41[H]	高精度鏡面式	静電容量式:CH1	静電容量式:CH2	静電容量式∶CH3	塩化リチウム式		
0ヶ月(2012/5)	10. 78	11.16	10. 89	9.76	*		
3ヶ月(2012/8)	9.97	10. 07	9.92	9.11	9. 61		
6ヶ月(2012/11)	4. 12	4. 36	4.12	3. 15	4. 19		
12 ヶ月 (2013/5)	12. 02	12. 13	11.82	10. 77	12. 37		
14ヶ月(2013/7)	13. 23	13. 49	13. 21	12. 12	13. 40		
16 ヶ月(2013/9)	9.88	10. 15	9.84	8.80	10. 10		
20ヶ月(2014/1)	-1. 02	-0. 92	-1. 13	-1.87	-0. 76		
24 ヶ月(2014/5)	12. 98	13. 07	12. 80	11.75	13. 49		

Table 7 静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との出力比較(平均値)

* 初回の塩化リチウム式露点検出器の測定は,機器調達の都合により測定を実施していない。

	高精度鏡面式露点検出器との平均値における偏差 [°C]						
時間	【() は瞬間値における最大編差を絶対値で表記する。】						
	静電容量式:CH1	静電容量式:CH2	静電容量式∶CH3	塩化リチウム式			
0ヶ月(2012/5)	0. 38 (0. 78)	0. 11 (0. 54)	-1.02 (1.40)	*			
3ヶ月(2012/8)	0. 10	-0.05	-0.86	-0.36			
	(0. 84)	(1.02)	(1.51)	(0.70)			
6ヶ月(2012/11)	0. 24	0.00	-0.97	0.07			
	(0. 62)	(0.44)	(1.25)	(0.21)			
12ヶ月(2013/5)	0. 11	-0.20	-1.25	0.35			
	(0. 28)	(0.44)	(1.51)	(0.50)			
14ヶ月(2013/7)	0. 26	-0.02	-1. 11	0.17			
	(0. 71)	(0.33)	(1. 46)	(0.37)			
16ヶ月(2013/9)	0. 27	-0.04	-1.08	0.22			
	(0. 95)	(0.60)	(1.62)	(0.67)			
20ヶ月(2014/1)	0. 10	-0. 11	-0.85	0.26			
	(0. 35)	(0. 38)	(1.06)	(0.41)			
24ヶ月(2014/5)	0.09	-0. 18	-1. 23	0. 51			
	(0.36)	(0. 32)	(1. 41)	(0. 59)			

Table 8 静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との偏差

* 初回の塩化リチウム式露点検出器の測定は、機器調達の都合により測定を実施していない。



Fig. 10 静電容量式露点検出器と塩化リチウム式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との比較(平均値)



Fig. 11 静電容量式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との比較(2012.5.15-16)



Fig. 12 静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との比較(2012.8.22-23)



Fig. 13 静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との比較(2012.11.20-21)



Fig. 14 静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との比較(2013.5.29-30)



Fig. 15 静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との比較(2013.7.31-8.1)



Fig. 16 静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との比較(2013.9.25-26)



Fig. 17 静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との比較(2014.1.22-23)



Fig. 18 静電容量式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との偏差(2012.5.15-16)



Fig. 19 静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との偏差(2012.11.20-21)



Fig. 20 静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との偏差(2013.5.29-30)



Fig. 21 静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検出器と高精度鏡面式露点検出器との偏差(2013.9.25-26)

(2) 高精度鏡面式露点検出器のホース長さが各露点検出器に与える影響

高精度鏡面式露点検出器の吸気ライン長さによる同検出器の出力への影響を評価するため,所 定の計測が完了した後,吸気ラインを取り外し,静電容量式露点検出器,塩化リチウム式露点検 出器及び高精度鏡面式露点検出器の各露点検出器の計測を実施した。Fig.22 に高精度鏡面式露点 検出器の吸気ホース取外し前後における各露点検出器露点温度の経時変化を示す。吸気ホース取 外し前後で各検出器の指示値の変化は確認されなかった。Table 9 に高精度鏡面式露点検出器の吸 気ホース取外し前後における高精度鏡面式露点検出器に対する静電容量式露点検出器,塩化リチ ウム式露点検出器の偏差を示す。静電容量式露点検出器で約 0.06℃,塩化リチウム式露点検出器 で約 0.03℃であり,吸気ホース取外し前後における有意な変化は見られなかった。

	高精度鏡面式露点枝	四年十 2除土前後の羊			
露点検出器	吸気ホース除去前	吸気ホース除去後	- 吸风小一入际云前後仍是 絶対値 [℃]		
静電容量式:CH1	-0. 22	-0. 28	0. 06		
静電容量式:CH2	0. 04	-0. 00	0. 04		
塩化リチウム式	-0. 50	-0. 47	0. 03		

Table 9 高精度鏡面式露点検出器のホース長さが各露点検出器に与える影響





(3) 「もんじゅ」各場所の環境条件の比較

Table 10 に原子炉格納容器の床上(空気雰囲気),床下(窒素雰囲気)及び一般的な建屋内の環 境である「もんじゅ」倉庫内に対して,これらの露点温度(水蒸気分圧も含む),環境温度・湿度, 塩分及び塵埃状態を示す。床下の露点温度,環境温度は 2009 年の CV-LRT の採取した値(露点温 度は塩化リチウム式露点検出器にて測定)であり,湿度は露点温度,環境温度より換算した。床 上の露点温度は長期検証試験(6,8ヶ月)で採取した値(塩化リチウム式検出器にて測定)であ り,湿度は露点温度,環境温度より換算した。「もんじゅ」倉庫内の環境温度・湿度は,気象庁発 表データ(6,8月)であり,露点温度は当該データより換算した。「もんじゅ」倉庫は,気象観 測で使用される百葉箱と同等の環境である。

比較の結果,床上は床下より露点温度,湿度が高く,また,塩分や塵埃の量も多く,露点検出 器の検出部にとって,より負荷の大きい環境条件であることを確認した。

	「もんじゅ」倉庫内 (屋内で換気空調設備がない環境)	CV 内床上 (空気雰囲気) (データ採取箇所)	CV 内床下 (窒素雰囲気)
露点温度 [℃]	約 20. 6℃ ^{※1}	Max. 10. 21°C ^{%3}	
【】内は露点温度か	[2429Pa]	【1246Pa】	Max -3 81°C *5 [160Pa]
ら算出した水蒸気分	約 23. 3°C ^{※2}	Max. 16. 26°C ^{%4}	
圧[Pa]を示す。	【2864Pa】	【1850Pa】	
環境温度[℃]	24. 9°C ^{⋇6} , 77% ^{⋇6}	21.5°C, 46% ^{**8}	20. 9℃ ^{×10}
湿度 [%]	29. 5℃ ^{%7} , 69% ^{%7}	25. 5℃, 50% ^{※9}	19% ^{※8}
塩分 [mg/m²]	約 90~470mg/m²	3mg/m ²	<3mg/m ²
	換気扇による外気取り入れ、及び	換気空調設備の給気側には、フィ	窒素を供給して、封じ込めて
	物品の搬出におけるシャッター開	ルターが設置されていることか	いる (セル構造である) ため,
塵埃状況	閉時の外気流入により、塵埃は多	ら、塵埃は少ない。	塵埃は CV 内床上より少ない。
	い。		

Table 10「もんじゅ」各場所の環境条件の比較

※1:6月の温度(24.9℃)、湿度(77%)条件から換算。

※2:8月の温度(29.5℃),湿度(69%)条件から換算。

※3:6ヶ月後データ(2010年6月,最小9.55℃,【1192Pa】)

※4:8ヶ月後データ(2010年8月,最小14.38℃,【1640Pa】)

※5: 2009 年 12 月に実施された CV-LRT の露点温度(最小値-8.39℃,【325Pa】)

※6:6月データ採取時の気象庁データ(敦賀市)の平均気温及び平均湿度。なお、この温度・湿度条件では、環境温度が 20.9℃ で結露の可能性がある。

※7:8月データ採取時の気象庁データ(敦賀市)の平均気温及び平均湿度。なお、この温度・湿度条件では、環境温度が23.3℃ で結露の可能性がある。

※8:6ヶ月後のデータ採取時。結露無し。空調設備にて管理されているため、「もんじゆ」倉庫内雰囲気に比べ湿度は低い。環 境温度と露点温度により、湿度を換算した。

※9:8ヶ月後のデータ採取時。結露無し。空調設備にて管理されているため、「もんじゅ」倉庫内雰囲気に比べ湿度は低い。

※10:2009 年 12 月に実施された CV-LRT の平均温度。結露無し。窒素で封入されている環境のため、床上雰囲気より湿度が低い。

(4) 静電容量式露点検出器,高精度鏡面式露点検出器の校正結果

Table 11 に最終試験(24 ヶ月)後のメーカー工場における静電容量式露点検出器 CH1, CH2 及び CH3 の校正結果を示す。CH1, CH2, CH3 と標準器との偏差は, CH3 の低温領域の一点(基準 露点:-56.6°C)を除き,メーカー精度(±2.0°C)内を維持しており,殆どの温度領域で±1.0°C以内 であった。

なお,基準となる高精度鏡面式露点検出器は,各測定月の試験前後において,JEAC4203-2008 の計器の精度要求(検出器と変換器の合成精度:±2.04℃)より約1桁精度が高い露点検出器で計 器校正を実施し,検出器精度(±0.2℃)を維持していることを確認した。一例として Table 12 に メーカー工場で実施した最終試験(24ヶ月)前後の校正結果を示す。

插進品	静電容	量式:CH1	抽准品	静電容	量式:CH2	抽准品	静電容	量式:CH3
惊华奋	露点温度	偏差	[⁰○]	露点温度	偏差	际午 奋	露点温度	偏差
	[°C]	[°C]		[°C]	[°C]		[°C]	[°C]
-10.0	-9.8	0.2	-10.0	-9.9	0.1	-10.0	-10.4	-0.4
-40.0	-39.3	0.7	-40.0	-39.4	0.6	-40.0	-39.4	0.6
-56.6	-56.0	0.6	-56.8	-57.2	-0.4	-56.6	-50.0	6.6
-10.4	-10.0	0.4	-10. 4	-10.3	0.1	-10. 1	-10.6	-0.5
-5.5	-5. 2	0.3	-5.5	-5.5	0.0	-5.0	-6.0	-1.0
0.6	0.3	-0.3	0.6	-0.1	-0.7	1.0	-0.5	-1.5

Table 11 静電容量式露点検出器の最終試験(24ヶ月)後の校正結果

Table 12 高精度鏡面式露点検出器の最終試験(24 ヶ月)前後の校正結果

	高精度鏡面式露点検出器					
標準器[℃]	24 ヶ月試験前	前(2014/5/14)	24ヶ月試験後(2014/6/17)			
	露点温度[℃]	偏差[°C]	露点温度[℃]	偏差[℃]		
-10.00	-9.89	0. 11	-9.88	0. 12		
0.00	0. 09	0. 09	0. 09	0. 09		
10.00	10. 05	0. 05	10. 05	0. 05		
20.00	20.00	0.00	20.00	0.00		
23.00	22. 97	-0. 03	22. 98	-0. 02		

6. 考察

6.1 CV-LRT 条件下における検証試験の考察

本試験結果では,静電容量式露点検出器(検出器 A, B)と塩化リチウム式露点検出器(20 台の平均値及び床上に設置した検出器 ME-20(Fig.5 の D20 に配置された検出器))のそれぞれの指示値は,Fig.9 に示す様に時間経過と共に同様に増加傾向した。静電容量式露点検出器は,CV-LRT にて本設で使用される塩化リチウム式露点検出器と同様の挙動を示したことから,CV-LRT 環境下における露点温度への応答性に問題はないと考える。なお,CV-LRT 中の露点温度の上昇の原因に関しては後述する。

静電容量式露点検出器は、塩化リチウム露点検出器と比較すると最大 0.5 ℃ほど低い指示値を 示した。この指示値の差は、双方の計器精度(塩化リチウム式露点検出器の計器精度:±0.5 ℃, 静電容量式検出器の計器精度:±2.0 ℃)の違いによるものと考えられる。しかし、この差が JEAC4203-2008の計器精度(検出器と変換器の合成精度:±2.04℃)以内であったこと、また、検 出器 A、B の指示値がほぼ同一の値であったことから、静電容量式露点検出器は、CV-LRT におい て、有意な個体差を発生させることなく、計器精度を満足していることを確認した。

試験後の計器校正結果からは,静電容量式露点検出器に計器調整を行う必要のある誤差が生じていないことから, CV-LRT 環境による影響は無いと考えられる。

したがって、静電容量式露点検出器を「もんじゅ」の CV-LRT の露点検出器に採用することは 可能であると考える。

なお,塩化リチウム式露点検出器において,20台の平均値と検出器 ME-20の測定値に差が生じ たことに関しては,原子炉格納容器内の床上の水蒸気分圧の上昇によるものと考えられる。原子 炉格納容器に設置された 80箇所 (Fig.5参照)の温度計の測定結果からは,Fig.23に示す様に通常 空気雰囲気エリアの床上,床下と,通常窒素雰囲気エリアの床下において,有意な温度変動は見 られなかった。このことから空気雰囲気エリアの床上,床下と窒素雰囲気エリアの床下における 換気空調の違いによる影響は除外される^{*}。一方,同じく原子炉格納容器に設置された20箇所(Fig.5 参照)の塩化リチウム式露点検出器から算出した蒸気分圧は,Fig.24 に示す様に通常空気雰囲気 エリアの床上,床下のみに上昇が見られた。この様な現象は,過去に行われた高速実験炉「常陽」 の CV-LRT においても観測されている^{[6][7]}。この原因は CV-LRT 前に開放されていた機器ハッチ等 の開口部から導入された空気中の湿分が原子炉格納容器内のコンクリート構造体や機器配管の保 温材等に吸収され,これらが CV-LRT 中に原子炉格納容器内雰囲気に放出された結果によるもの と推定される^[6]。窒素雰囲気エリアの床下は,常時隔離された状態で,一定条件で管理された窒 素が常時循環しているため,水蒸気分圧の上昇は生じなかったと考えられる。これらの結果,検 出器 ME-20 の露点温度が平均値より上昇したものと考えられる。

* 空気雰囲気エリアの床上,床下の換気空調システムは,共通の換気空調ユニットで外気を取り 入れ冷却し循環しており,CV-LRT 中は外気取り入れを遮断し,循環・冷却機能は一部を遮断 している。一方,窒素雰囲気エリアの床下の換気空調システムは,ループ毎に独立しており, 常時循環・冷却している。



Fig. 23 CV-LRT における原子炉格納容器内の温度変化



時刻

Fig. 24 CV-LRT における原子炉格納容器内の水蒸気分圧の変化

6.2 長期検証試験の考察

Table 10 に示した原子炉格納容器内の床上(空気雰囲気),床下(窒素雰囲気)の環境の比較から,床上は床下に比べ,露点温度,湿度が高く,また,塩分や塵埃の量も多く,露点検出器の検出部にとって,より負荷の大きい環境条件であることを確認した。床上での空気雰囲気における長期検証試験は,床上,床下の雰囲気が窒素雰囲気となる CV-LRT 時の環境に比べ,露点検出器の検出部への負荷が大きい試験環境であることから,長期検証試験の測定値は,CV-LRT の環境条件による影響を網羅した値であることを意味する。

この様な試験環境下にあって,静電容量式露点検出器のCH1,CH2の指示値は,本設の塩化リ チウム式露点検出器の指示値,また,基準となる高精度鏡面式露点検出器の指示値に対して,Fig.11 ~17に示す通り露点温度の増減が同様の挙動を示したことから,静電容量式露点検出器の応答性 に問題はないと考える。Table 7,Fig.10のCH1,CH2の指示値と高精度鏡面式露点検出器の指示 値との偏差はTable 8に示す通り平均測定値で0.38℃(瞬間値で1.02℃)であり,JEAC4203-2008 の計器精度(検出器と変換器の合成精度:±2.04℃)以内を維持し続けた。したがって,静電容量 式露点検出器は,床上の環境条件で2年間程度であれば,時間経過における露点検出器としての 性能劣化を考慮する必要なく,計測に供することが可能であると考えられる。ただし,本試験は 床上のみの実施であることから,これ以外の場所での利用を計画する場合,事前に計器設置場所 の粉塵濃度が原子炉格納容器内床上を下回る清浄度であることを確認する必要がある。

静電容量式露点検出器 CH3 に関しては,基本的に CH1, CH2 の挙動と同じものの(Fig.11~17), 基準となる高精度鏡面式露点検出器に対する偏差は CH1, CH2 よりも大きく (Table 8),また,0, 6,12,16 ヶ月の測定において変動が見られた (Fig.18~21)。特に0,6 ヶ月の測定においては, 一時測定が止まり (ホールド状態),その後再開された測定値が若干低い値を示す現象が見られた (以下、当該現象をステップ変化と言う)。これらは,静電容量式露点検出器のセンサーパージ機

能が影響したものと考えられる。

センサーパージ機能は、センサーを加熱することによって、内部に付着したケミカル成分や不 純物を除去し、精度、応答性を向上させるための機能である。測定値は、センサー加熱後冷却さ れるまでの間はホールドされ(約5分間)、再計算される。ただし、本機能は元々低露点環境向け (相対湿度:10%RH以下)に開発された機能であるため、中高湿度環境下で作動すると、空気中 の水分量の違いによりセンサーに影響を及ぼす可能性がある。

長期検証試験を実施した「もんじゅ」の原子炉格納容器床上の湿度は,Table 10 に示す通り約50%RH であり,中高湿度環境に該当する。センサーパージの頻度は,CH1,CH2 と CH3 ではそれぞれ異なった設定をしていた (CH1,CH2:1回/10日,CH3:1回/1日)。CH3の偏差が CH1,CH2の偏差と比べて大きいことに関しては,中高湿度環境下でのセンサーパージの起動頻度が高く,長期検証試験中に繰り返しセンサーパージが起動したため (CH1,CH2:約73回/24ヶ月,CH3:約730回/24ヶ月),センサーが影響受け,生じたものと考えられる。

また,特に 0,6 ヶ月の測定において CH3 の測定値のみにステップ変化が見られたことに関し ては,センサーパージ起動時の原子炉格納容器内の環境が原因であると考えられる。センサーパ ージ後の測定値は,不純物等の除去率によってはセンサーパージ前に比べ低い値を取る可能性が ある。これは,センサーパージによってセンサー内の多くの水分が除去されるものの,水分中に 含まれるケミカル成分が完全に除去されず,その結果,露点温度が低下するものと推察される。 センサーパージ機能は,CH3以外にもCH1,CH2に適用されており,ステップ変化は長期検証試 験中にCH1,CH2,CH3 共に生じていたが,CH3のセンサーパージ起動頻度がCH1,CH2より 高く設定されていたため,CH3のステップ変化が長期検証試験中に観測されやすい状況にあった と考えられる。その様な中で特に0,6ヶ月の測定時期における原子炉格納容器内の湿度,粉塵等 の状態がセンサーパージによる不純物等の除去率に影響を与え,ステップ変化が観測されたもの と考える。長期検証試験期間における原子炉格納容器内は,CV-LRTの試験状況とは異となり隔 離された状態では無いため,人,物品・機材等の出入りがあり,床上の環境は測定月毎に異なる。

しかしながら、CH3 の偏差は、長期検証試験期間を通して JEAC4203-2008 の計器精度(検出器 と変換器の合成精度:±2.04℃)以内にあった。また、CH3 の偏差が CH1、CH2 の偏差より大き いものの、これは製品試作時に許容された個体差であり、当該個体差は出荷時に修正が可能であ る。そのため、今回確認された現象による静電容量式露点検出器への問題は無いと考える。さら に、センサーパージ機能は、低露点領域で有効な機能である。そのため、中露点温度雰囲気(0 ~15℃程度/相対湿度 20~60%RH)である「もんじゅ」原子炉格納容器内において、当該機能は 必要が無く、当機能を無効にして使用しても問題ないと考える。

高精度鏡面式露点検出器の吸気ホース取外し前後において,高精度鏡面式露点検出器と各露点 検出器の指示値差に有意差は無かった。このことから本試験において,高精度鏡面露点検出器の 吸気ホースが鏡面露点検出器指示値に与える影響は無視できると考える。したがって,本試験に おいて基準となる高精度鏡面式露点検出器の指示値は妥当であると考えられる。

- 31 -

7. 結論

もんじゅプラント保全部は、「もんじゅ」のプラント工程への影響を低減するため、現在、CV-LRT で用いている塩化リチウム式露点検出器の代替品として、静電容量式露点検出器の検証試験を実施した。

CV-LRT(試験雰囲気:窒素雰囲気,試験期間:24時間)における静電容量式露点検出器の測定 結果は,既存の塩化リチウム式検出器と比較して有意な差は無いことを確認した。さらに,長期 検証試験(試験雰囲気:空気雰囲気,試験期間:2年間)においては,静電容量式露点検出器は, JEAC-4203-2008の要求する機器精度(検出器と変換器の合成精度:±2.04℃)を長期間にわたり有 することを確認した。

これらのことから,静電容量式露点検出器は,塩化リチウム式露点検出器の代替露点検出器として, CV-LRT 環境下での使用が可能であり,かつ,メンテナンスによる「もんじゅ」プラント工程への影響がなく,また,長期間の運用が可能である露点検出器であることが確認できた。

謝辞

本試験において,適切な助言とご支援をいただきましたヴァイサラ株式会社の新井啓之氏,稲 本信夫氏,津田孝輔氏及び田中淳平氏に心から感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 日本電気協会,日本電気協会電気技術規程(原子力編)JEAC 4203-2008「原子炉格納容器の漏え い率試験規程」.
- [2] 原子力安全・保安院, 独立行政法人原子力安全基盤機構, 日本電気協会「原子炉格納容器の漏 えい率試験規程」(JEAC 4203-2008)に関する技術評価書, 平成 21 年 2 月.
- [3] 国内計量法.
- [4] 日本工業規格 JIS Z 8806:2001「湿度-測定方法」.
- [5] Yusuke CHIBA et al., Long-term verification test of dew point hygrometer for CV-LRT in MONJU, TEMPMEKO 2016 XIII International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Abstracts, 2016, pp193-194.
- [6] 田村政昭,磯崎和則,高速実験炉「常陽」の格納容器全体漏洩率試験,日本原子力学会誌, Vol.27, No.10, 1985, pp.57-70.
- [7] 田村政昭,磯崎和則,高速実験炉「常陽」の格納容器全体漏えい率試験ー試験方法の確立と基準化-,動燃技報,No.52,1984,pp.77-85.

_

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	ci単位しの粉結的な間接け
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	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J		
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)		
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$		