

原子力発電所における蓄電池の劣化に関する国際調査結果(案)

令和 4 年 5 月 26 日

技術基盤課

本報告は、OECD/NEA 傘下の原子力施設安全委員会(CSNI)の作業会(WG)の一つである電源系統作業会(WGELEC)が最近まとめた「直流電源系統に関する技術報告書」[1]の概要に、技術基盤課による蓄電池劣化事象や直流電源の保安規定ならびに試験標準・規格に関する調査を追加し、規制庁の今後の対応を検討したものである。

1. 技術報告書の概要

1.1. 背景と目的

原子力発電所(NPP)における最近の運転経験が示すように、高い信頼性(独立性、多重性、試験能力等)が要求される安全関連機器・系統の電源系統では、蓄電池の正しい使用と正しい保守が重要な要素となっている。

WGELEC では、NPP の安全性に影響する蓄電池の劣化加速や不良に対する方策に関する情報や経験を収集し、WG メンバー国間で情報共有することを目的として、国際調査を行った。その調査結果をまとめたものが、「直流電源系統に関する技術報告書」である。

1.2. 調査方法と結論

予備的調査として、メンバー国に対してアンケートを行い、その結果をもとに NEA-IAEA の共同技術会合が開かれた。アンケートと会合から、蓄電池の設計や使用・保守に関する重要な経験や教訓が収集され、以下に示す 5 つの所見と 4 つの推奨事項が得られた。

1.2.1. 所見

- 1) 現行の所内蓄電池の製品サイクル(設計認証、据付、試験、検査、交換)について、メンバー国ごとに大きな違いはなく、国内もしくは国際的に策定されたガイダンスに従っている。
- 2) ほとんどのメンバー国で、ベント型鉛蓄電池が使用されている。
- 3) **容量試験<Capacity test>**の実施間隔は数年以上と長いため、連続監視や定期目視点検は、蓄電池の多様な劣化の早期発見に役立つ。
- 4) 蓄電池が関わる事象の多くは、種々の劣化メカニズム(例:腐食、製造欠陥、不適切な雰囲気条件)による割れが影響している。
- 5) NPP では一般に、劣化の兆候や問題が現れる前に蓄電池を取り換えるという、保守的な交換基準を設けている。

1.2.2. 推奨事項

- 1) 事業者が新しく蓄電池を調達する場合、腐食劣化問題に焦点を置くべきである。蓄電池の寿命を保証するように、材料と製造の品質管理がなされているかどうか。
- 2) 急速充電サイクル中に発する熱によって、鉛蓄電池の寿命は著しく劣化し得ることを事業者は考慮しなければならない。
- 3) ベント型鉛蓄電池の運転経験によれば、ほとんどの問題は既知である。蓄電池セルの不良早期発見を可能にし、先行管理型の蓄電池交換を行えるよう、事業者は月例の目視検査と2から5年間隔の定期容量試験を検討すべきである。
- 4) 高信頼性が求められる直流電源システムでは、蓄電池とその関連機器(充電器など)に多様性を考慮すべきである。

2. 技術基盤課による調査

2.1. 蓄電池・充電装置劣化事象

IAEA の原子力発電所における情報報告システム(IRS)を用いて、2000 年以降に発生した蓄電池・充電装置に関わる事例を検索・抽出した。その中で、以下の3事例が蓄電池・充電装置の劣化に関わる。

表 1 蓄電池劣化事例

IRS	概要
8468	
8619	
8704	

赤点線枠内は国際機関との取り決めにより公開できません。

2.2. 直流電源の保安規定

劣化した蓄電池は、NPP の安全関連の直流電源の動作可能性に影響することから、直流電源の標準的保安規定^{a)}におけるサーベランス要求(SR)について、日米比較調査した。なお、国内には NPP の蓄電池の保全や試験に直接言及する規制ガイドはないが、民間規格である JEM1431「原子力発電所用据置鉛蓄電池の試験方法」[2]が使用されている。米国には規制ガイド RG1.129「NPP のベント型鉛蓄電池の保守、試験と交換」[3]が規定され、国際標準である IEEE450-2010^{b)}「据置ベント型鉛蓄電池の保守、試験と交換に対する推奨使用」[4]をエンドースしている。技術基盤課による考察も表に追加した。

表 2 に、BWR の場合は原子炉の状態が運転、起動および高温停止、PWR の場合はモード 1、2、3 および 4 における直流電源系統(蓄電池パラメータ含む)に対する保安規定上の SR について、日米比較した[5][6][7][8][9][10]。技術基盤課による考察も表に追加した。

表 2 直流電源系統標準保安規定

国内	米国
BWR-1: [技術 GM]は、定期検査において、直流電源(蓄電池および充電器)の機能を確認する。 PWR-1: [発電室長]は、定期検査時に、非常用直流電源の健全性を確認する。 「考察:具体的な試験・点検項目は、JEM1431に規定されている。」	SR3.8.6.1: [7日]ごとに、各蓄電池浮動電流が[2A]以下であることを確認する。 SR3.8.6.2: [31日]ごとに、各蓄電池パイロットセルの浮動電圧が[2.07V]以上であることを確認する。 SR3.8.6.3: [31日]ごとに、各蓄電池セルの電解液液位が、設計限界値以上であることを確認する。 SR3.8.6.4: [31日]ごとに、各蓄電池パイロットセルの温度が設計限界値以上であることを確認する。 SR3.8.6.5: [92日]ごとに、各蓄電池セルの浮動電圧が[2.07V]以上であることを確認する。
BWR-2: [当直長]は、原子炉の状態が運転、起動および高温停止において、[3系列]の蓄電池および充電器について、浮動充電時の蓄電池電圧が[126V ^{c)}]以上であることを1週間に1回確認する。 PWR-2: [当直課長]は、モード1、2、3および4において、1週間に1回、浮動充電時の蓄電池端子電圧が[127.1V]以上であることを確認する。	SR3.8.4.1: [7日]ごとに、蓄電池端子電圧が最小浮動充電電圧以上であることを確認する。
「考察:右記SRに該当するものは国内保安規定にはない。」	SR3.8.4.2: [18か月]ごとに、最小浮動充電電圧以上で[4時間]以上、充電器が[発電所供用系用は400A、DG系用は100A]以上供給することを確認する。 または、設計基準事象に対する放電後に多様な通常連続負荷の最大デマンドを供給しつつ、充電器が蓄電池を[24]時間以内にフル充電できることを確認する。

^{a)} 米国では、技術仕様書<Technical specifications>と呼ぶ。

^{b)} 最新は IEEE450-2020。

^{c)} 浮動充電時の1セルあたりの電圧が既定値 2.15±0.05V であること。蓄電池は60セルあるので、126V 以上であれば健全との考えに基づく。

国内	米国
「考察:右記 SR に該当するものは国内保安規定にはないが、蓄電池の 想定負荷放電試験 は JEM1431 に規定されている。ただし、実施時期は工場試験時のみであり、運用中の定期試験としての実施要求はない。」	SR3.8.4.3:[18 か月]ごとに、蓄電池 供用試験 における設計負荷サイクルで要求される非常時負荷を蓄電池容量が供給、維持するに十分であることを確認する。 注 1) 改良性能放電試験 (SR3.8.6.6)を実施することで、本 SR を実施したとみなせる場合がある。 注 2)本 SR は、モード[1、2 および 3]には通常適用されない。ただし、プラントの安全性が維持、向上されていることを仮定して、動作可能性を再評価する際に、本サーベランスの一部を実施する場合がある。計画外事象に対して、この SR を満足することが求められる場合がある。
「考察:右記 SR に該当するものは国内保安規定にはないが、蓄電池の 容量試験 は JEM1431 に規定されている。ただし、 容量試験 は工場試験時に実施した後は、蓄電池の使用年数が想定寿命年数の 60%程度以降に実施することが望ましいと記述されている。」	SR3.8.6.6:[60 か月]ごとに、ただし、期待蓄電池寿命の[85%]に到達しかつ容量が製造者定格の 100%未満の場合は 12 か月ごとに、期待蓄電池寿命の[85%]に到達しかつ容量が製造者定格の 100%以上の場合には 24 か月ごとに、 性能放電試験 または 改良放電試験 の際に、蓄電池容量が製造者定格の[80%]以上であることを確認する。 注)本 SR は、モード[1、2 および 3]には通常適用されない。ただし、プラントの安全性が維持、向上されていることを仮定して、動作可能性を再評価する際に、本サーベランスの一部を実施する場合がある。計画外事象に対して、この SR を満足することが求められる場合がある。

[]は、NPP ごとに異なる。

2.3. JEM 規格の据置鉛電池の試験及び点検項目

国内 NPP における定期検査で行う据置鉛電池の試験及び点検項目は、民間規格である JEM1431 に規定されている。主要な試験及び点検項目を表 3 に示す[2]。

表 3 据置鉛蓄電池の主要な試験及び点検項目と実施時期

試験及び点検項目		工場試験	現地据付試験	運用中定期点検			経年劣化確認
				日常	6 か月	1 か年	
構造検査	外観	✓	✓	✓	✓	✓	—
	寸法	✓	—	—	—	—	—
電解液測定(ベント型)	純度	✓	—	—	—	—	—
	比重	✓	✓	—	✓	✓	—
	温度	✓	✓	—	✓	✓	—
	液面位	✓	✓	✓	✓	✓	—
蓄電池表面温度測定(制御式)		—	✓	✓	✓	✓	—
内部抵抗測定(制御式)		✓	✓	—	—	✓	—
電圧測定		✓	✓	✓	✓	✓	—
接続部点検(ボルト等の緩み)		—	✓	—	—	✓	—
容量試験		✓	—	—	—	—	✓
想定負荷放電試験		✓	—	—	—	—	—

JEM1431 では据置蓄電池の容量試験を規定しているが、実施時期を工場試験時と経年劣化を確認する場合に限定し、定期試験としては規定していない。製造者の推奨する蓄電池寿命年数等を目安とし、容量試験の結果から蓄電池の寿命年数を判断し、寿命に至る前に全数の蓄電池を交換することが望ましいと記載されている。また、その寿命年数の 60%程度以降から、経年劣化を確認する目的の容量試験を開始することが望ましいとしている。

また、JEM1431 では、**想定負荷放電試験**は工場試験として規定されているが、定期試験としては規定されていない。なお、原子力規制庁による実用発電用原子炉施設に係る新規制基準対応の使用前検査において、蓄電池に関する外観検査と系統運転性能検査が行われている。

2.4. IEEE 標準の蓄電池試験

米国の標準技術仕様書を始め多くの国で参照している IEEE450^aは、蓄電池の容量<capacity>及び能力<ability>確認を目的とした4つの**放電試験**の試験実施スケジュールについて言及している。試験のそれぞれの位置づけを表4に示す。

表 4 据置鉛蓄電池の放電試験の種類と位置付け

放電試験と目的	試験頻度、放電時間と放電流、補足
受入試験 <Acceptance test> 目的: 容量確認	<ul style="list-style-type: none"> 工場試験もしくは初期据付試験としての容量試験。 放電時間は負荷サイクルと同程度を推奨。 放電流は製造者定格/調達仕様に基づく一定電流もしくは一定負荷。
性能放電試験 <Performance discharge test> 目的: 容量確認	<ul style="list-style-type: none"> 供用開始から2年以内に実施する容量試験。定期試験も追加すべき。 放電時間は負荷サイクルと同程度を推奨。 放電流は製造者定格/調達仕様に基づく一定電流もしくは一定負荷。 設計寿命や運転温度を加味し、試験間隔は期待供用寿命の25%以下。 劣化兆候ありもしくは供用寿命の85%に到達したら年毎。 劣化兆候あり: 前回試験から10%以上容量低下または製造者容量定格の90%未満。
改良性能放電試験 <Modified performance discharge test> 目的: 容量及び能力確認	<ul style="list-style-type: none"> 負荷サイクルに関連付けて電流を増加させた一定電流容量試験。 供用試験と/または性能放電試験の代わりとして、どの時期でも実施可。 試験間隔は24か月を超えてはならない。 放電時間は負荷サイクルに蓄電池選定で使用した経年劣化係数を乗じたものを推奨。
供用試験 <Service test> 目的: 能力確認	<ul style="list-style-type: none"> 蓄電池(as found)が負荷サイクルを満足するかどうか確認する試験。 性能放電試験の合間で、使用者の裁量で決めた頻度^bで実施。劣化兆候ありでも、頻度は変えない。 システム試験設計者が、試験手順と許容基準を決める。蓄電池は as found 条件で試験され、温度や使用年数による補正は行わない。 負荷サイクルのクリティカルな期間の電圧トレンドから、設計要求を満たさなくなる時期を予測可。 IEEE485 で選別された蓄電池の場合は、温度、負荷、経年劣化に対応したマージンのおかげで、供用寿命にわたって十分な容量がある。

^a 調査した米国標準技術仕様書が参照しているのは IEEE450-2002。

^b RG1.129 Rev.3 では、供用試験は性能試験に追加して実施しなければならない。試験間隔は24か月を超えてはならないと補足されている。

なお、容量計算には、試験前の温度補正のために、以下に示す 2 つの電解液温度に対する調整方法がある。②が正確であるが、①より試験が困難となることから、放電時間に応じて選択する。放電時間がちょうど 1 時間の場合は、①②とも適用可能である。

- ① 時間調整法<Time-adjusted method> [1 時間以上の放電時間に適用]

$$\text{容量}\%(25^{\circ}\text{C}) = \frac{t_A}{t_S \times K_T} \times 100$$

t_A : 規定の端子電圧に対する放電時間、 t_S : 規定の端子電圧に対する定格時間、
 K_T : 試験開始前の電解液温度に対する補正係数。

- ② 放電流調整法<Rate-adjusted method> [1 時間以内の放電時間に適用]

$$\text{容量}\%(25^{\circ}\text{C}) = \frac{X_a \times K_C}{X_t} \times 100$$

X_a : 試験電流または電力、 K_C : 温度補正係数、
 X_t : 規定の端子電圧に対する放電時間での定格電流または電力。

3. 今後の対応案

原子力情報公開ライブラリー(NUCIA)の情報検索機能を使って、国内 NPP 及び原燃サイクル施設における蓄電池・充電装置のトラブルまたは保全品質情報を検索したが、事例は 1 件も見つからなかった。国内 NPP 及び原燃サイクル施設では、安全関連の蓄電池の劣化問題は顕在化していないと考えられる。また、原子力規制庁による新規制基準対応の使用前検査においても、蓄電池の系統運転性能検査が行われている。したがって、蓄電池等の劣化及び劣化評価に関して、緊急規制対応の必要性はないと考えられる。

しかしながら、技術報告書の 4 つの推奨事項は国内 NPP の標準的保安規定並びに JEM1431 に明確に規定されていないので、実態を確認する必要があると考えられる。また、それらの推奨事項は、NPP に限らず、安全関連電源に蓄電池を使用しているその他の原子力施設にも関わる。したがって、安全関連直流電源に蓄電池を使用している国内原子力事業者は技術報告書の推奨事項に関連する以下 4 項目に対する見解を聴取することとしたい。

- 1) 国内では蓄電池の腐食劣化問題は報告されていないが、念のため、従来型及び非従来型蓄電池の腐食劣化問題や関連する品質管理問題の有無を確認する必要がある。
- 2) 国内 NPP では通常、浮動充電もしくは均等充電が実施され、急速充電は実施されていない。急速充電に係るトラブル報告もないが、念のため、国内原子力施設における急速充電の実態について確認する必要がある。
- 3) 国内 NPP では、2 から 5 年間隔の**定期容量試験**は、標準的な保安規定においても JEM 規格においても要求されていない。また、NPP 据付後の蓄電池能力を確認する目的の**定期供用試験**は、標準的な保安規定にも JEM 規格にも規定されていない。国

内 NPP ならびにその他原子力施設における蓄電池の劣化監視と蓄電池交換の実態ならびに蓄電池の能力確認の実態について確認する必要がある。

- 4) 国内原子力施設における蓄電池とその関連機器(充電器など)の信頼性向上(多様化等)に向けた取り組みについて確認する必要がある。

4. 参考情報

- [1] The CSNI Working Group on Electrical Power Systems (WGELEC), Technical Report on: Activity-4 “DIRECT CURRENT POWER SYSTEMS,” Draft 09/2021
- [2] (一社)日本電機工業会、JEM1431:原子力発電所用据置鉛蓄電池の試験方法
- [3] REGULATORY GUIDE 1.129, Revision 3, MAINTENANCE, TESTING, AND REPLACEMENT OF VENTED LEAD-ACID STORAGE BATTERIES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, 2013,
<https://www.nrc.gov/docs/ML1317/ML13170A112.pdf>
- [4] Institute of Electrical and Electronics Engineers, (IEEE) Standard 450-2010, IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Vented Lead-Acid Batteries for Stationary Applications, 2011
- [5] (独)原子力安全機構、原子炉施設保安規定と Standard Technical Specifications の比較表(その1)(BWR)、平成17年
- [6] (独)原子力安全機構、原子炉施設保安規定の係る技術資料に関する報告書(その1)、平成17年
- [7] (独)原子力安全機構、原子炉施設保安規定と Standard Technical Specifications の比較表(その2)(PWR)、平成17年
- [8] (独)原子力安全機構、原子炉施設保安規定の係る技術資料に関する報告書(その2)、平成17年
- [9] US NRC NUREG-1433, Standard Technical Specifications General Electric BWR/4 Plants, Revision 4.0, Volume 1, Specifications, 2012,
<https://www.nrc.gov/docs/ML1210/ML12104A192.pdf>
- [10] US NRC NUREG-1431, Standard Technical Specifications Westinghouse Plants, Revision 4.0, Volume 1, Specifications, 2012,
<https://www.nrc.gov/docs/ML1210/ML12100A222.pdf>