

原子力発電所の直流電源系統の短絡事故時のEMTPによる応答解析

Transient evaluation using EMTP at short-circuit accident of direct current power supply systems for nuclear power plants

嶋田 善夫 (Yoshio Shimada) *1 徳久 聡 (Satoshi Tokuhisa) *2

要約 原子力発電所の直流電源系統は、福島第一原子力発電所事故に見られるように、非常用炉心冷却系統 (ECCS) 等に安定した電力を供給し、原子炉の安全を維持するうえで極めて重要な電源である。米国NRCは、規制文書 Information Notice (IN) 2017-06「蓄電池及び充電器の短絡電流による直流電源系での電気故障への影響」を発行し、設計上の新たな脆弱性として検討を開始している。本研究では、この問題に関し、NRC報告書NUREG/CR-7229に記載された実験結果について、電気過渡応答解析コード (EMTP) によるシミュレーションを行い、応答に関する知見を得た。

キーワード 直流電源系統, NRC, EMTP

Abstract The DC power supply systems of nuclear power plants for the object of this research are critical to supply stable electric power to such systems as the emergency core cooling system (ECCS), and to maintain the safety of the nuclear power reactor; this was from the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. USNRC issued regulatory documents (IN 2017-06 "Battery and Battery Charger Short-circuit Current Contributions to a Fault on the Direct Current Distribution System"), and has commenced to review the problem. This research used simulation by the electro-magnetic transients program (EMTP) and obtained findings that clearly specified the response for the experimental results described in NRC Report NUREG / CR-7229, regarding this problem.

Keywords DC power supply system, NRC, EMTP

1. 背景および目的

研究対象の直流電源系統は、福島第一原子力発電所事故に見られるように、非常用炉心冷却系統 (ECCS) 等に安定した電力を供給し、原子炉の安全を維持するうえで極めて重要な電源である。米国NRCでは、規制文書「INFORMATION NOTICE (IN) 2017-06 蓄電池及び充電器の短絡電流による直流電源系での電気故障への影響」を発行し、充電器と蓄電池が並列接続している場合の充電器からの初期の短絡電流が、IEEE 946-2004「発電システム用のDC補助電源システムの設計に対するIEEEの推奨例」⁽¹⁾に記載されている定格電流の150%に制限されず、定格電流の700%流れることを新発見と

して提唱した。なお、規制文書発行の元となった事象は、2011年9月25日、Palisades発電所にて発生したものであり、同発電所においては、125V直流分電盤内の作業中に、保守作業員が当該盤内の母線を短絡させ、直流電源系の片系列が喪失したことにより、ECCS起動、主蒸気隔離、補助給水起動等が発生し、運転員に複雑な対応を要求する事態となった。NRCは、当該事象に対して、特別検査チームを派遣するとともに、IN2013-17⁽²⁾を発行して、原子力事業者に注意喚起を行った。NRCは、当該事象のうち、充電器がトリップして、片系列の直流電源系が喪失した原因が未解明であったことから、充電器および蓄電池の短絡実験を実施し、その結果をNUREG/CR-7229⁽³⁾「直流配電系の故障に寄与する

*1 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現 関西電力(株)

*2 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

蓄電池および充電器の短絡電流を評価するための試験」として2017年2月付で公開した。当該の実験結果は、新知見として充電器からの短絡電流が、従来考えられていたものより、はるかに大きいことを示していた。この新知見により、NRCは、2017年9月26日付でIN2017-06を発行し、原子力事業者に対して、「現状の短絡電流計算や保護協調設計をレビューすべきである」として、注意喚起した。

原子力安全システム研究所では、ECCSなどの安全関連負荷が順次起動した場合の非常用ディーゼル発電機の電圧・周波数の過渡応答解析⁽⁴⁾や、外部電源の電圧変動がECCSなどの安全関連負荷に与える影響解析について、EMTP⁽⁵⁾(Electro-Magnetic Transients Program：電磁過渡解析プログラム)で検証を行った実績がある。今回は、NRCの研究報告書NUREG/CR-7229に記載された実験結果について、EMTPによるコンピュータシミュレーションにて応答の知見を得ることにより、実験結果の再現および検証を行った。

2. シミュレーションについて

NUREG-CR-7229に記載されている、①蓄電池単独の短絡実験結果、②SCR(サイリスター)型充電器単独の短絡実験結果、③蓄電池とSCR型充電器並列時の短絡実験結果について、下記に示すシミュレーション回路図を用いEMTPのシミュレーションを行い、実験結果とシミュレーション結果の比較を行った。

結果と考察は以下の通りである。

(1) シミュレーションの回路図について

シミュレーションの回路図を図1に示す。当該回路図はNUREG/CR-7229に記載された実験結果

をEMTPによりシミュレーションするために作成した充電器/蓄電池の等価回路図⁽⁶⁾である。また、各回路素子の説明を、以下の1~16に記載した。

- 1：充電器の電圧(26.94V, NUREG/CR-7229から読み取った。)
- 2：充電器の過電流抑制用の非線形抵抗器(当該抵抗の電流-電圧特性を図2に示す。当該充電器は、最大電流を110Aに抑制する垂下特性を有しており、当該電流値に抑制できるように電流-電圧特性を設定した。)
- 3および4：充電器本体からの電流制限回路の応答時間が長いことによる初期短絡電流の寄与分をコンデンサーと抵抗によりモデル化した。(3の大容量コンデンサー(5.5F(ファラッド)), 初期電圧(26.94V), 4の抵抗(0.026Ω))
- 5：逆流防止用の整流器
- 6：平滑用のコイル(0.5mH, NUREG/CR-7229に記載がないため、実験結果が再現できる値を独自に選定した。)
- 7および8：平滑用のコンデンサーと内部抵抗(7のコンデンサー(23,000μF, 初期電圧(26.94V), 8の抵抗(0.001Ω)), NUREG/CR-7229に記載がないため、実験結果が再現できる値を独自に選定した。)
- 9：逆流防止用の整流器
- 10：初期負荷の抵抗(1.3255Ω, 初期負荷電流が、NUREG/CR-7229に記載の20Aとなるように抵抗値を選択した。)
- 11：充電器側を短絡、開放するためのスイッチ
- 12および13：短絡回路の抵抗とコイル(12の抵抗(0.0007762Ω), 13のコイル(0.028mH, NUREG/CR-7229の値を採用)

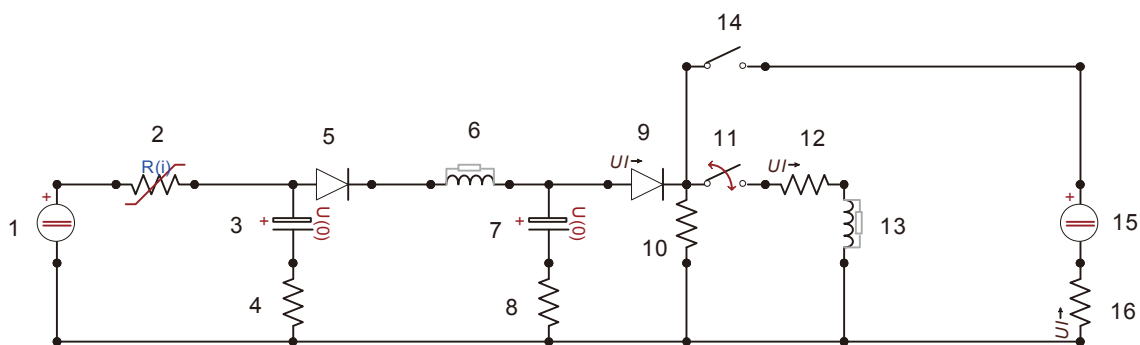


図1：充電器および蓄電池の短絡実験のEMTPによるシミュレーション回路図

- 14: 蓄電池側を短絡, 開放するためのスイッチ
- 15: 蓄電池の無負荷時の電圧 (24.78V, NUREG/CR-7229の値を採用)
- 16: 蓄電池の内部抵抗 (0.001092 Ω, NUREG/CR-7229の値を採用)

回路図中の非線形抵抗2の電流-電圧特性曲線を図2に示す。

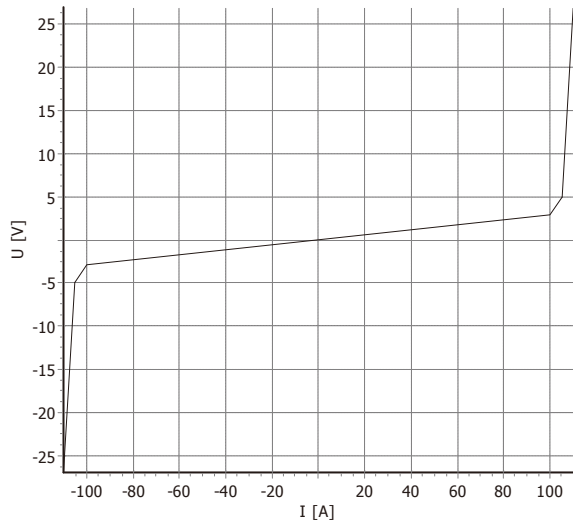


図2 図1の回路図中の非線形抵抗2の電流-電圧特性曲線

(2) NUREG/CR-7229の実験結果とEMTPのシミュレーション結果の比較

(a) 蓄電池単独の短絡実験とEMTPのシミュレーション結果の比較

NUREG/CR-7229に記載されている米国蓄電池メーカー3社の蓄電池を単独で短絡させた場合の実験結果を図3に示す。また、C&D社の蓄電池を単独で短絡させた場合のシミュレ-

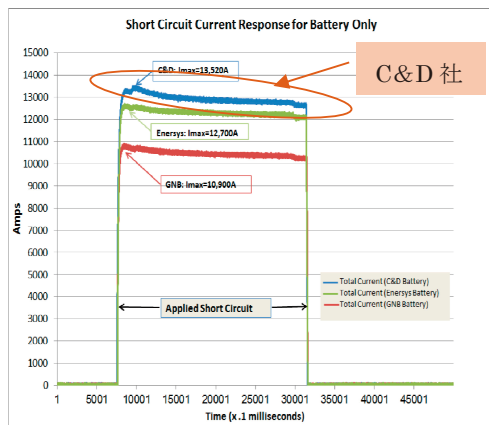


図3 実験結果 (3社の蓄電池) (NUREG/CR-7229より抜粋)

ーション結果を図4に示す。さらに、図3, 4の短絡直後の0.1秒間の結果をそれぞれ、図5, 6に示す。短絡時の最大電流については、実験結果 (電流値: 13,520A) とシミュレーション結果 (電流値: 13,255A) がほぼ一致した。実験結果の短絡電流が短絡後に徐々に減少していく原因は、短絡させた回路の発熱により抵抗値が増加したためである。シミュレーション回路は、発熱による抵抗値の増加をモデル化していないので、当該の電流減少は見られなかった。

(b) SCR (サイリスタ) 型充電器単独の短絡実験とEMTPのシミュレーション結果の比較

NUREG/CR-7229に記載されているSCR型充電器を単独で短絡させた場合の実験結果を図7に示す。また、SCR型充電器を単独で短絡させた場合のシミュレーション結果を図8に示す。短絡時の平滑コンデンサーからの放電および充電器本体からの電流制限回路の応答時間が長いことによる短絡電流の応答については、実験結果とシミュレーション結果がほぼ一致した。

図7, 8の短絡直後の0.5秒間の結果をそれぞれ図9, 10に示す。外観の応答はよく再現しているが、細部の応答 (周波数の高い振動) はシミュレーションで再現されなかった。なお、その原因は特定できなかった。

(c) 蓄電池 (米国メーカー3社) とSCR型充電器並列時の短絡実験とEMTPのシミュレーション結果の比較

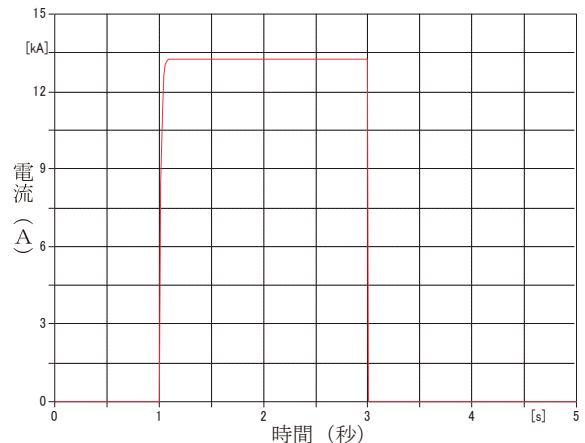


図4 シミュレーション結果 (C&D社のみ)

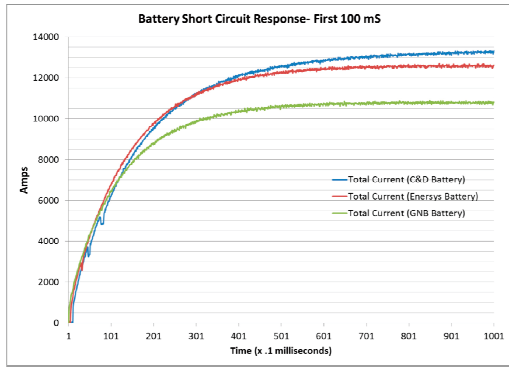


図5 実験結果 (3社の蓄電池)
(図3の短絡直後の0.1秒間)
(NUREG/CR-7229より抜粋)

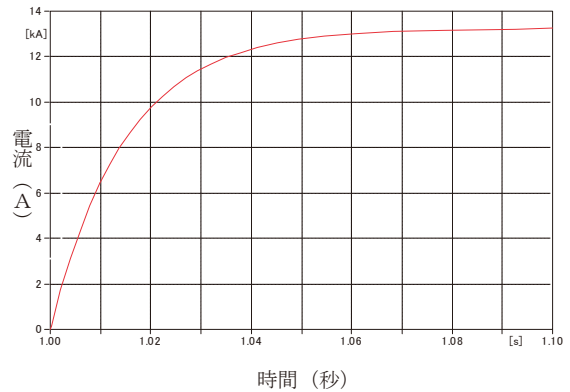


図6 シミュレーション結果 (C&D社のみ)
(図4の短絡直後の0.1秒間)

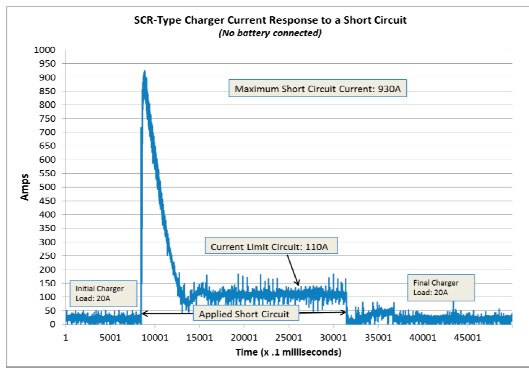


図7 実験結果 (SCR型充電器)
(NUREG/CR-7229より抜粋)

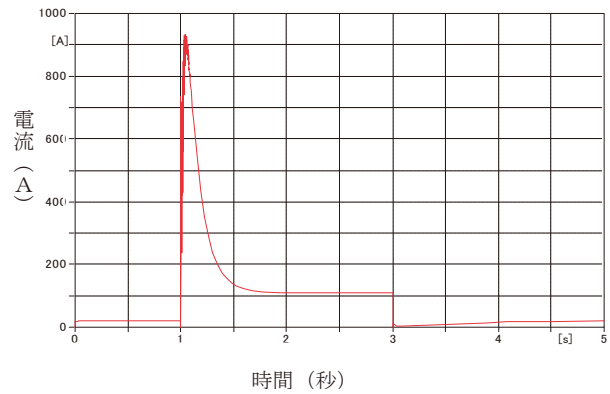


図8 シミュレーション結果 (SCR型充電器)

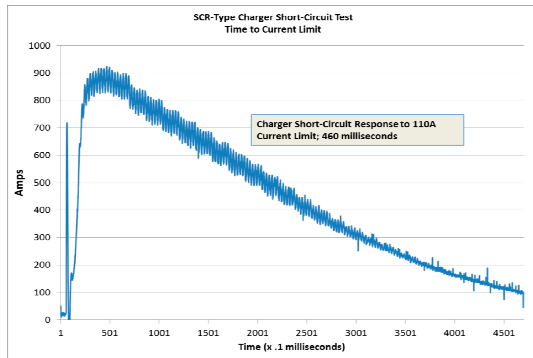


図9 実験結果 (SCR型充電器)
(図7の短絡直後の0.5秒間)
(NUREG/CR-7229より抜粋)

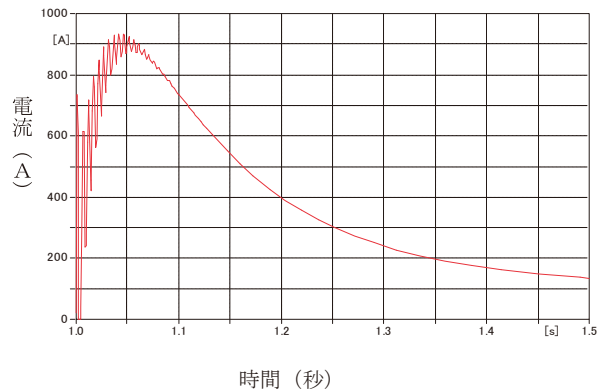


図10 シミュレーション結果 (SCR型充電器)
(図8の短絡直後の0.5秒間)

NUREG/CR-7229に記載されている蓄電池 (米国メーカ3社) とSCR型充電器並列時の充電器の短絡電流の実験結果を図11に示す。同図には比較対象として充電器単独の実験結果が記載されている。C&D社の蓄電池とSCR型充電器並列時の短絡電流および比較対象とした充電器単独のシミュレーション結果を図12に示す。また、図11、12の短絡直後の0.5秒間

の結果をそれぞれ、図13、14に示す。それぞれを比較した結果、外観の応答はほぼ再現されたが、細部の応答 (周波数の高い振動) はシミュレーションで再現されなかった。なお、その原因は特定されなかった。

また、実験結果は、3.5秒以降に蓄電池の充電が再開しているが、シミュレーションでは、再現されなかった。その原因は、実験では充

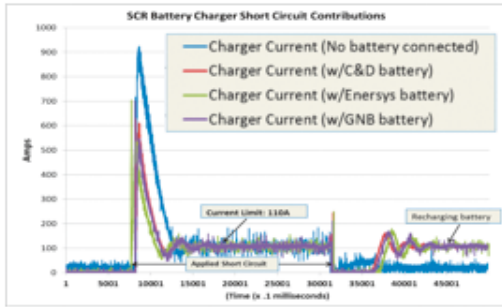


図11 実験結果（蓄電池（3社）とSCR型充電器並列）
（NUREG/CR-7229より抜粋）

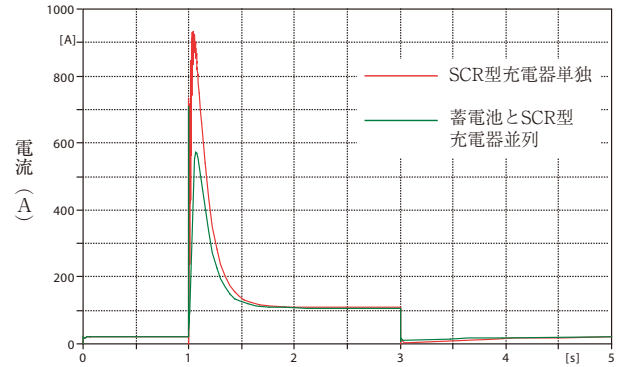


図12 シミュレーション結果
（C&D社の蓄電池とSCR型充電器並列）

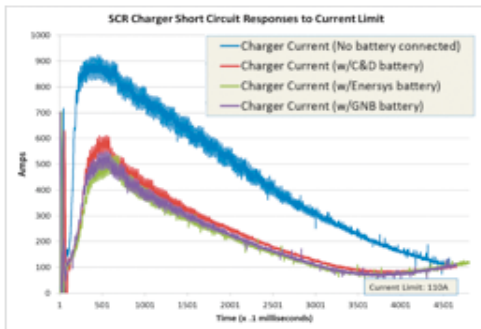


図13 実験結果（蓄電池（3社）とSCR型充電器並列）
（図11の短絡直後の0.5秒間）
（NUREG/CR-7229より抜粋）

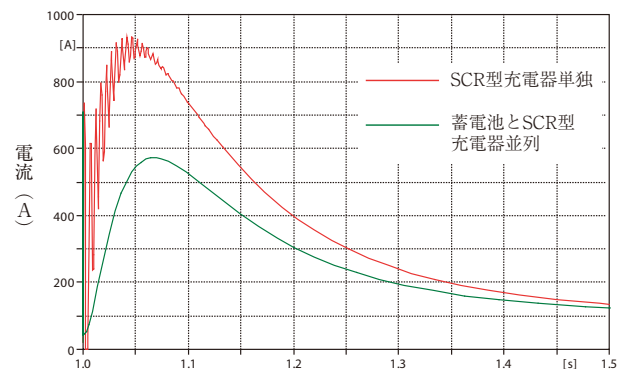


図14 シミュレーション結果
（C&D社の蓄電池とSCR型充電器並列）
（図12の短絡直後の0.5秒間）

電器と蓄電池を常時並列しているが、シミュレーションでは短絡させている時間間隔のみ並列接続しているためである。充電器と蓄電池が並列した場合に、充電器からの短絡電流が低下する応答は、シミュレーションによってほぼ再現された。充電器と蓄電池が並列した場合に、充電器からの短絡電流が低下する原因は、蓄電池からの10,000Aを超える短絡電流により、図1の回路図中の短絡回路の抵抗とコイル（12, 13）の電圧が上昇し、充電器からの短絡電流は減少するためである。

3. まとめ

NUREG-CR-7229に記載されている、①蓄電池単独の短絡実験結果、②SCR（サイリスター）型充電器単独の短絡実験結果、③蓄電池とSCR型充電器並列時の短絡実験結果について、シミュレーション回路図を用いEMTPのシミュレーションを行い、実験結果とシミュレーション結果の比較を行った。

* NUREG/CR-7229に記載されている蓄電池単独の短絡実験とEMTPのシミュレーション結果を

比較したところ、短絡時の最大電流については、実験結果とシミュレーション結果がほぼ一致する結果となった。しかし、短絡回路の発熱により、短絡電流が漸減する現象は、シミュレーションでは再現されなかった

* NUREG/CR-7229に記載されているSCR型充電器単独の短絡実験とEMTPのシミュレーション結果を比較したところ、実験結果とシミュレーション結果がほぼ一致する結果となった。しかし、外観の応答はほぼ再現されたが、細部の応答はシミュレーションで再現されなかった。

* EMTPのシミュレーション結果を比較したところ、外観の応答はほぼ再現できているものの、細部の応答は再現されなかった。また、実験結果では、3.5秒以降に蓄電池の充電が再開しているが、シミュレーションでは再現されなかった。充電器と蓄電池が並列した場合に充電器からの短絡電流が低下する応答は、シミュレーションによってほぼ再現された。

参考文献

- (1) IEEE ,IEEE 946-2004 - IEEE Recommended Practice for the Design of DC Auxiliary Power Systems for Generating Systems.
- (2) NRC INFORMATION NOTICE 2013-17: SIGNIFICANT PLANT TRANSIENT INDUCED BY SAFETY-RELATED DIRECT CURRENT BUS MAINTENANCE AT POWER.
- (3) NRC NUREG/CR-7229 "Testing to Evaluate Battery and Battery Charger Short Circuit Current Contributions to a Fault on the DC Distribution System.
- (4) 嶋田 善夫,「非常用ディーゼル発電機のコンピュータシミュレーションによる過渡性能評価」, INSS JOURNAL, Vol.19, P221 (2012).
- (5) Meyer, W.S., et al Editors "EMTP Rule Book" Portland, Oregon, Revised 1992. Bonneville Power Administration, System Engineering, 1980.
- (6) MAXIME BERGER "FIRST EMTP-RV BENCHMARK FOR OFF-LINE SIMULATION OF RAPID TRANSIT TRAIN DC AUXILIARY SYSTEMS, DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL DÉCEMBRE 2015.