

回生エネルギーの効率的な利用に関する調査研究

Study on effective utilization of regenerative power by electric energy storage system



藤田 徹夫*



小倉 秀文**



中平 雅士*

In recent years, the concern over an effective energy saving measures has risen. To reduce the environmental impact of railway, electric energy storage systems have been installed to some substations in East Japan Railway Company (JR-EAST). The research of electric energy storage system mounted Nickel metal hydride battery modules (Ni-MH storage system) was examined for effective utilization of regenerative braking power. This experimental verification test was performed at Kori substation, Ōme-line in JR-EAST. In this paper, the examination results of Ni-MH storage system are explained.

●キーワード：回生電力、ニッケル水素 (Ni-MH) 蓄電池、電力貯蔵装置、直流母線電圧

1. はじめに

JR東日本では、環境負荷低減に向けた取り組みとして、運転エネルギーの更なる消費低減に向け、回生エネルギーの効率的な利用に着目し、直流き電区間における電力貯蔵装置の導入に向けた取り組みを行っている。本稿では、蓄電池の充放電制御を不要とした簡易な方式が特徴であるニッケル水素 (NiMH) 蓄電池を用いた電力貯蔵装置 (以下、「Ni-MH貯蔵装置」という。) について、2012年度から2013年度にかけ、青梅線古里変電所に試験設備を仮設して実証試験を行った結果を報告する。

2. 実証試験概要

2.1 設置場所の概要

実証試験設備は青梅線の古里変電所に設置した。青梅線は東京西部地区の通勤・通学輸送を担う路線であるとともに御岳・奥多摩などの山間エリアを有している。青梅線の線路構成を図1に示す。古里変電所は、青梅線の最も終点側にある変電所であり、次のような環境を有している。

- (1) 運行する車両はすべて回生ブレーキを採用している (表1)
- (2) 単線区間の古里駅近傍にある
- (3) 列車運転間隔が30分程度の閑散線区にある (表1)
- (4) 下り勾配 (最大20%) 区間に電力を供給しており回生ブレーキの使用頻度が高い

古里変電所の単線結線図を図2に示す。

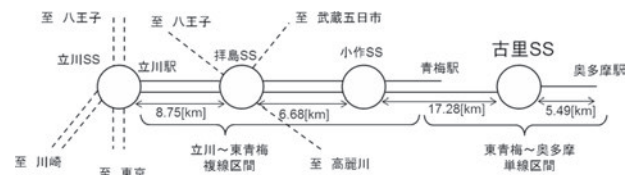


図1 青梅線線路構成

表1 列車編成及び運転間隔

駅間	列車編成	運転間隔
立川～青梅	6M4T (一部 4M2T)	5～15分
青梅～奥多摩	2M2T (一部 4M2T)	30分

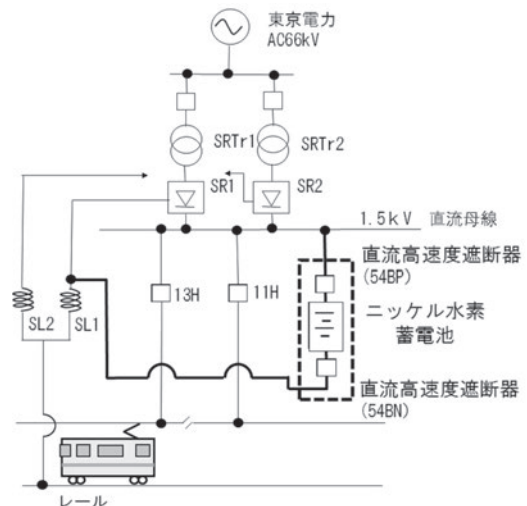


図2 古里変電所単線結線図

2.2 古里変電所における試験設備設置状況

今回は試験設備であるため、図3のように変電所建屋内にNi-MH貯蔵装置を仮設した。図1および図2に示したように、古里変電所の11H回線は青梅方のき電系、13H回線は奥多摩方のき電系を負担している。整流器は容量3000[kVA] (電圧変動率8%) が2台設置されている。Ni-MH貯蔵装置は、直流母線側とレール側にそれぞれ直流高速度遮断器を介し

て接続されている。Ni-MH蓄電池の設置数量は、古里変電所の無負荷時における直流母線電圧、列車運転頻度や列車編成などを考慮し、43モジュール直列×1並列とした。今回使用したNi-MH蓄電池（1モジュールあたり）の仕様を表2に示す。



図3 Ni-MH貯蔵装置設置状況

表2 Ni-MH蓄電池仕様（1モジュール）

公称電圧	36[V]
定格容量	141[Ah]
エネルギー容量	5.1[kWh]
最大出力	126[kW]

2.3 試験期間および評価内容

営業線における効果を検証することを目的として約1年半の間、2回にわけて実証試験を行った。

2回の内訳は、2012年5月29日～2013年1月21日（内、Ni-MH貯蔵装置運転は60日）および2013年5月29日～2013年10月21日（内、Ni-MH貯蔵装置運転は26日）であり、以下の内容を検証した。

- (1) Ni-MH貯蔵装置の充電に対する評価
- (2) Ni-MH貯蔵装置の放電に対する評価
- (3) 母線電圧の違いによる回生電力量の影響

3. 実証試験結果

3.1 Ni-MH蓄電池の充電評価

Ni-MH貯蔵装置は図2に示したとおり、整流器と蓄電池が直結した、充放電制御を不要とするシステム構成のため、電池の充電電力の中には、回生電力によらない充電（整流器からの直接的な充電（以下、「直接充電」という。）が存在する。古里変電所における試験では、図4に示すように直接充電による充電量が電池全充電量に対し、60～80%程度含まれる結果となった。

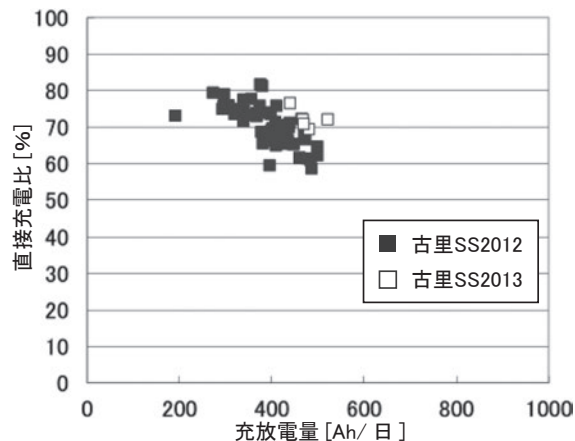


図4 整流器からNi-MH蓄電池への直接充電割合

そこで、この直接充電が大きくなる要因について検証を行った。ここでは、整流器（SR）とNi-MH貯蔵装置間に直列リアクトル（SL）が挿入されていることで整流器の特性に違いが生じ、直接充電量への影響が生じているのではないかと仮定し、試験を行った。試験回路を図5に示す。左図の整流器1号（SR1）のみ運転では、整流器-Ni-MH貯蔵装置回路内にSLが存在せず、右図の整流器2号（SR2）のみ運転では、SLが存在することからSR1とSR2の運用を変えることで比較を行うこととした。

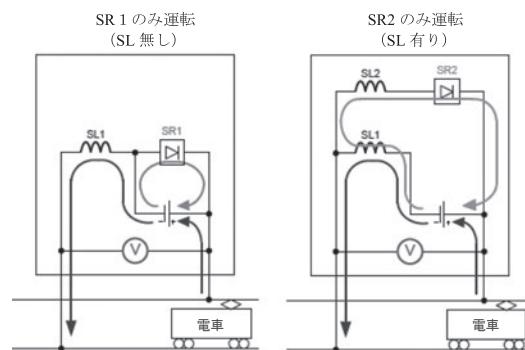


図5 試験回路構成

表3に2012年度の試験結果を、表4に2013年度の試験結果を示す。これらの結果より、2012年度試験では、接続回路にSLがあることによって直接充電がおおよそ半減する結果となったが、2013年度試験では、半減とはいかないものの10%程度の若干の低減が見られた。

2012年度と2013年度でこのような違いが見られたため、直接充電割合が大きく変わる要因についてさらに考察することとした。整流器2号のみの運転試験結果における年度別比較のグラフを図6に示す。図6では、2012年度に比べ2013年度は、列車から発生する回生電力によるもの（以下、「回生吸収」という。）の割合が減少し、直接充電割合が増加しているのがわかる。

表3 2012年度試験結果 (10時台~15時台)

試験内容	計測日	電池放電電流量 [Ah]	電池充電電流量 [Ah]	電池充電内訳 [Ah]		最高気温 [°C]
				直接充電量	回生吸収量	
整流器1号のみ運転 (SL無し)	12/3	127	118	76 (64%)	42 (36%)	7.1
	12/5	139	132	79 (60%)	53 (40%)	12.4
整流器2号のみ運転 (SL有り)	12/11	110	103	34 (33%)	69 (67%)	10.3
	12/13	110	101	26 (26%)	75 (74%)	11.3

表4 2013年度試験結果 (10時台~15時台)

試験内容	計測日	電池放電電流量 [Ah]	電池充電電流量 [Ah]	電池充電内訳 [Ah]		最高気温 [°C]
				直接充電量	回生吸収量	
整流器1号のみ運転 (SL無し)	6/3	145	148	100 (68%)	48 (32%)	27.6
	6/12	146	148	99 (67%)	49 (33%)	21.3
整流器2号のみ運転 (SL有り)	6/5	119	121	74 (61%)	47 (39%)	27.7
	6/7	119	122	64 (52%)	58 (48%)	24.7
	6/10	121	123	68 (55%)	55 (45%)	26.0
	7/2	114	119	74 (62%)	45 (38%)	28.0
	7/4	124	127	80 (63%)	47 (37%)	26.0

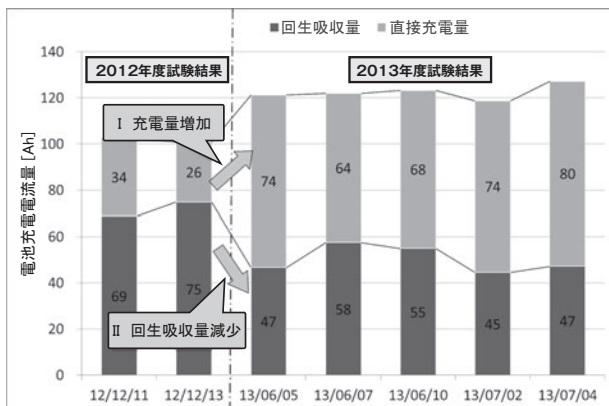


図6 整流器2号のみ電池充電電流量内訳 (10時台~15時台)

Ni-MH貯蔵装置の電池挙動を長期的に見た場合、電池は放電した分、充電を行うと言える為、電池の充電量は放電量に依存する。また、Ni-MH貯蔵装置の特性により、電池の放電量は整流器の出力量に依存する傾向にある(3.2参照)。このことから、電池の充電量は、変電所整流器の出力量に依存する傾向にあるとも言える。

一方、電池の充電量内訳は、回生吸収と、整流器からの直接充電に分けられる。すなわち、電池の全体充電量より回生吸収量を差し引いたものが直接充電量であり、回生吸収量が少ないほど、直接充電量は増加する。

古里変電所での運用環境下においては、電池の放電分を補うのに十分な回生電力が得られるとは言えず、必然的に直接充電の割合が大きいことが考えられるが、その大きさについては、電池全体充電量と回生吸収量のいずれか、またはその両方の変化が大きく影響していることが考えられる。つまり、

直接充電量を捉えるには、(変電所出力量によって変化する)電池充放電量と回生吸収量を把握する必要がある。なお、電池の回生吸収量は古里変電所における回生電流量(ここでは、古里変電所に戻ってきた電流量)に影響される。図7は、整流器2号のみ運転時の回生電流量を示したものである。2012年度に比べて2013年度は回生電流量が約30%減っていることがわかり、それにより電池の回生吸収量が減少し、結果的に直接充電量の割合が増えたものと考えられる。

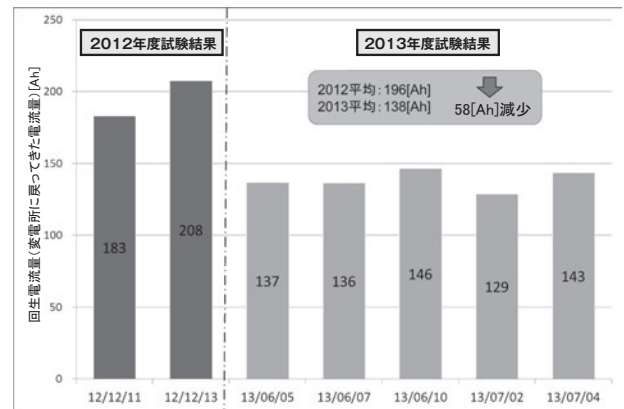


図7 整流器2号のみ運転における回生電流量(10時台~15時台)

以上より、直接充電量の大小には、整流器とNi-MH貯蔵装置間におけるSL有無の影響のよりも、気象条件や運用状況によって変動する古里変電所の出力量と変電所に戻ってくる回生電流量の方が影響している可能性としては大きいものと推察される。

3.2 Ni-MH蓄電池の放電評価

図8に、日単位の整流器出力と蓄電池放電量の関係を示す。

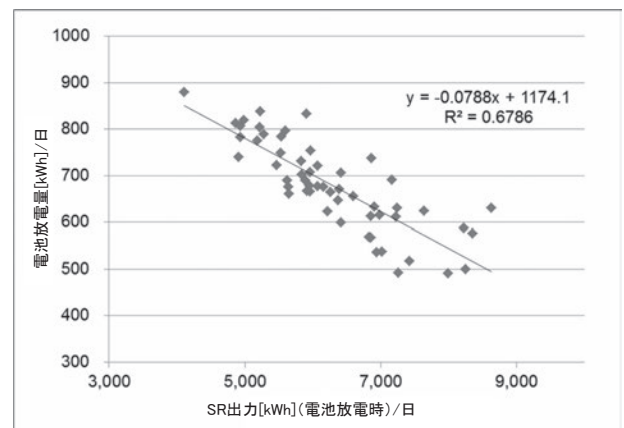


図8 整流器出力と蓄電池放電量の関係

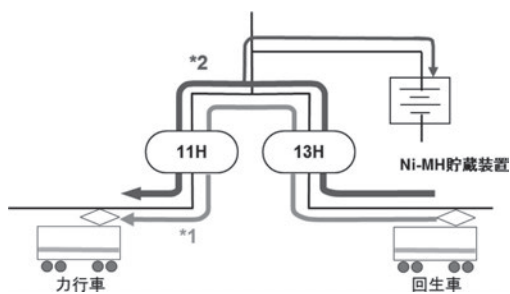
整流器の出力が増加するとともに、蓄電池の放電量が減少する傾向にあるものの、試験期間全体を通して、整流器の出力に対して蓄電池は1割程度出力されていることがわか

る。蓄電池の放電挙動については、過去に報告¹⁾されており、母線電圧の変化量と電池電流変化量の比がNi-MH蓄電池の内部抵抗値に近似であることが証明されている。このことから蓄電池放電量は蓄電池の内部抵抗値に依存性が高いものと考えられる。

3.3 母線（送出）電圧の違いによる効果

3.3.1 回生電流評価

古里変電所を基準にみた場合、図9に示す通り、一方の回線（13H）で発生した回生による電流は、変電所を跨いでもう一方の回線（11H）へと流れる（以下、「回生融通」という。）。また、変電所にNi-MH貯蔵装置を設置した場合は、列車間における回生融通に加え、電池への充電（回生吸収）が行われる。このように、列車減速時に発生した回生電力は、架線を通して他の力行列車と貯蔵装置に供給されるが、より多くの回生を引き出すことができれば蓄電池の回生吸収量が多くなる。ところが、通常時、送出電圧が高めに設定されている古里変電所の運用条件においては、列車の回生絞込み開始電圧とパンタグラフ点電圧の差が小さい為、発生する回生電力に制限をかけてしまっている可能性がある。そこで、送出電圧を変更し、変電所母線電圧を下げた場合の、列車の回生絞込み開始電圧との差を通常電圧時よりも大きくした場合における効果について検証を行った。



- ※1. 列車間での回生融通
- ※2. 列車間での回生融通+Ni-MH貯蔵装置による回生吸収

図9 回生電流の流れ

表5に、送出電圧変更試験における結果を示す。

表5 2012年度-2013年度回生電流量比較[Ah/日]

母線電圧条件	試験年度 (全平均値)	回生電流	Ni-MH貯蔵装置による 回生電流増加分 (: kWh 積算値)
通常送出電圧	2012 - 2013	432Ah	150Ah (255kWh)
送出電圧を 約70V下げた場合	2012 - 2013	793Ah	299Ah (493kWh)

変電所送出電圧を下げたことで、回生電流量が多くなる結果となり、全平均値では通常電圧時の約2倍の回生電力量を得られる可能性があることがわかった。

3.3.2 直接充電への影響

3.1において、直接充電に影響を与える因子として、回生吸収の大きさを挙げた。回生吸収が増加すれば直接充電の減少に寄与する為、Ni-MH貯蔵装置にとっても、効率的な運用が可能となる。前項において、送出電圧を変更したことで、変電所に戻ってくる回生電流の変化を示した。つまり、回生電流が増えることにより電池への回生吸収が増加すれば、整流器からの直接充電が減少されるものと期待できる。表6に電池充電量の内訳を示す。通常電圧時に全充電量の内、7割近くあった直接充電が、回生電流量が増えたことで電池の回生吸収量が増え、5割まで減少することがわかった。

表6 電池充電量内訳 [Ah/日]

母線電圧条件	試験年度 (全平均値)	電池 充電量	電池充電内訳	
			直接充電量 (: 割合)	回生吸収量 (: 割合)
通常送出電圧	2012 - 2013	410Ah	278Ah (68%)	132Ah (32%)
送出電圧を 約70V下げた場合	2012 - 2013	654Ah	317Ah (48%)	337Ah (52%)

4. まとめ

本研究では、青梅線古里変電所にNi-MH蓄電池を用いた充放電制御をしない貯蔵装置を仮設し、2012年度から2013年度にかけて実証試験を行った。その間、Ni-MH貯蔵装置は蓄電池の過放電、過充電や装置の不具合もなく、列車運行への支障も発生させずに安定稼働した。試験としてはNi-MH蓄電池の直接充電量を含む充電評価ならびに放電評価を行い、さらに母線電圧を変更した際の効果について検証を重ねた。結果として、古里変電所のような回生電流量が少ない変電所では、全充電量に対する直接充電分が約6~8割と多いものの、変電所の送出電圧を変更して母線電圧を下げることによって5割程度まで低減できることがわかり、回生電力量も倍増され回生エネルギーの効率的な活用が図られることも明らかになった。今後、電力貯蔵装置が導入される際に、本実証試験で得られた試験結果などが参考となり、運転エネルギー削減に寄与されることを期待するものである。

参考文献

- 1) 小倉 秀文, 中平 雅士, 菊地 伸也, 林屋 均, 寺島 章, 宮崎 崇, 吉山 栄二: ニッケル水素蓄電池を用いた電力貯蔵装置システムにおける充放電解析について, 第20回鉄道技術連合シンポジウム論文集, pp.187-190, (2013)