

平成21年5月29日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560294
 研究課題名（和文） 磁界解析を用いたインバータ用リアクトルの小形・低損失化に関する研究
 研究課題名（英文） Sturdy on Loss and Size Reduction of Reactor Connected to Inverter Power Supply Using Magnetic Field Analysis
 研究代表者
 村松 和弘（MURAMATSU KAZUHIRO）
 佐賀大学・理工学部・教授
 研究者番号：30263627

研究成果の概要：

本研究では、インバータ用リアクトルの小形・低損失化を目的とし、「鋼板中の渦電流を考慮した積層鉄芯の磁界解析法」を損失計算法に拡張し、本計算法と実験により損失を低減する鉄芯と押え板の形状を明らかにするとともに、開発した損失解析法の有用性を示した。なお、福岡県産業・科学技術振興財団実用化F S事業において、本研究で得られた最適構造の三相リアクトルが製作され、損失が従来型の約半分となり、本研究の目的の達成が実機でも確認されている。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電工工学・電力変換・電気機器

キーワード：リアクトル，インバータ電源，磁界解析，積層鉄芯，高調波，鉄損

1. 研究開始当初の背景

(1)社会的背景

モータなどの電動機を駆動する際には、始動特性や力率の改善、もしくは電流の高調波成分を抑制するためリアクトルが用いられる場合が多い。近年、駆動用電源として電流波形を自由に制御できるインバータ電源が盛んに用いられているが、この電源では電流波形にキャリア周波数に起因する高調波成

分が含まれ、リアクトルをインバータ電源下で使用すると、この高調波成分による鉄芯中の渦電流の増加によって、従来の正弦波交流電源下で用いる場合に比べて損失が増大するとともに、それに伴う温度上昇が問題となっている。現在は、この損失が増加するメカニズムが十分に明らかになっておらず高調波対策を適切に行う設計手法が確立されていないため、現行のインバータ用リアクト

ルでは、損失を低減するために鉄芯中の磁束密度を下げ、かつ熱容量を大きくするために、大形化せざるを得ないのが現状である。そのため、この高調波対策を適切に行う設計手法の確立とそれを用いたインバータ用リアクトルの小形・低損失化が望まれている。

(2)学術的背景

電気機器の現象解明を行うためには有限要素法を用いた磁界解析が有効であるが、現在、この方法を用いて電気機器の鉄芯の積層構造をそのままモデル化すると要素数が膨大となるため、積層鉄芯を塊状鉄芯に近似して解析が行われている。このとき、塊状鉄芯では鋼板中に流れる渦電流を直接考慮することができないためこれを無視して磁束分布を求め、例えば、鉄損を算出するためには、得られた磁束分布から別途実測で得られた素材の鉄損曲線を用いて鉄損を推定する方法が用いられている。しかしながら、今回のリアクトルをインバータ電源下で用いた場合の損失が増加するメカニズムを解明するためには、高調波成分に起因する鋼板中の渦電流が磁束の局所集中などに及ぼす影響も検討する必要がある。従来法では限界がある。これに関して、研究代表者らは、塊状鉄芯で近似された機器全体の解析（全体解析）において、鋼板中の渦電流の影響を考慮するため、鉄芯の要素および時間ステップ毎に、鋼板一枚の非線形渦電流解析（鋼板解析）を行い、求めた実効透磁率を塊状鉄芯の要素に与えて解析する方法を開発している。これにより、鋼板中の渦電流も考慮した積層鉄芯のモデリングを実用的な計算時間で行うことが可能となり、本手法を用いれば、高調波成分を含む場合に問題となる鋼板中の渦電流が鉄芯中の磁束分布に与える影響を明らかにできるため、鉄芯構造の観点から適切な高調波対策を施すことが期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、小形・低損失インバータ用リアクトルを開発することを目的とし、研究代表者らが開発した「鋼板中の渦電流を考慮した積層鉄芯の磁界解析法」を損失計算法に拡張するとともに、本計算法を用いて、正弦波交流電源で用いられる現行のリアクトルをインバータ駆動した場合の電流の高調波成分が磁束分布や損失分布に及ぼす影響を明らかにするとともに、損失を低減するための鉄芯や押え板の形状について試作実験も含めて検討し、小形・低損失インバータ用リアクトルを開発する。また、本研究で開発されたリアクトルを実際に製作し、損失低減効果を確認するとともに、本研究で開発された損失計算法の妥当性を検証する。

3. 研究の方法

(1)積層鉄芯の損失計算法の開発

インバータ電源に接続されたリアクトルの損失を計算する場合、電流に含まれる高調波成分により、鋼板中の渦電流の影響が無視できなくなる。そこで、研究代表者らによって既に開発済みである「鋼板中の渦電流を考慮した積層鉄芯の磁界解析法」を用いて得られた磁束および渦電流分布から鉄損を算出する損失計算法を開発する。

(2)現行リアクトルの損失分布の解析

前項(1)で開発された損失計算法を用いて、現行形状の単相リアクトルの磁束、渦電流および損失分布を、インバータ電源の高調波成分を含めた実際の電流波形を与えて計算し、高調波成分によって生じる磁束の局所集中や損失の増加箇所を明らかにする。

(3)損失低減のための改善設計

前項(2)で得られたインバータ用リアクトルの損失増加箇所に着目し、解析や試作実験により、損失を低減する鉄芯や押え板の形状などを明らかにする。

(4)実機三相リアクトルによる検証実験

福岡県産業・科学技術振興財団実用化F S事業により、項目(3)で提案された損失を低減する鉄芯や押え板の形状を有する実機の三相リアクトルの試作と詳細な検証実験が可能となったため、これにより、本研究で開発されたリアクトルの損失低減効果および本研究で開発された損失計算法を用いた設計方法の妥当性を検討する。

(5) 損失計算法の改良

前項(4)で明らかとなった本研究で開発した損失計算法の問題点について検討し、損失計算法を改善することにより設計方法を確立する。

4. 研究成果

(1) 積層鉄芯の損失計算法の開発

鋼板中の渦電流を考慮した積層鉄芯の磁界解析法を用いて得られた鉄芯および鋼板中の磁束分布、渦電流分布から、ヒステリシス損および渦電流損を算出する方法を開発した。

積層鉄芯の積層構造を考慮した磁界解析では、要素数の増加を避けるため、図1に示すように、積層鉄芯は異方性を有する塊状鉄芯で近似される。その際、塊状鉄芯で近似したモデル全体の解析（全体解析）において、鋼板間のギャップおよび鋼板中の渦電流の影響は、全体解析の要素毎に、別途、鋼板一枚の解析（鋼板解析）を行うことにより、実効的な透磁率を求め、その透磁率を塊状鉄芯モデルに与えて解析することにより考慮される。そのフローチャートを図2に示す。

鉄芯中の渦電流損は、本解析により得られた全体解析および鋼板解析で得られた渦電流分布より直接算出され、また、ヒステリシス損は、図3に示すように、全体解析および鋼板解析で得られた各部の磁束密度の時間的変化と実測で得られたヒステリシス曲線より算出される。この際、高調波成分によって生じるマイナーループのヒステリシス損失は、振幅が等しいメジャーロープのヒステリシス損失で近似した。

本損失解析法では、鋼板中の渦電流損が直接評価でき、また、発生要因別の詳細な鉄損の把握が可能である。

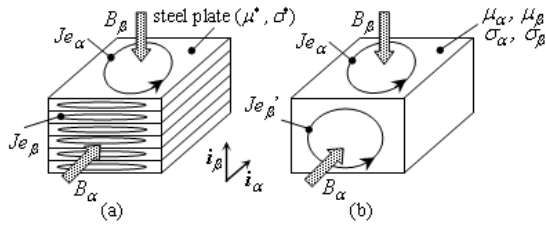


図1 積層鉄芯, (a) 実モデル, (b) 塊状鉄芯モデル

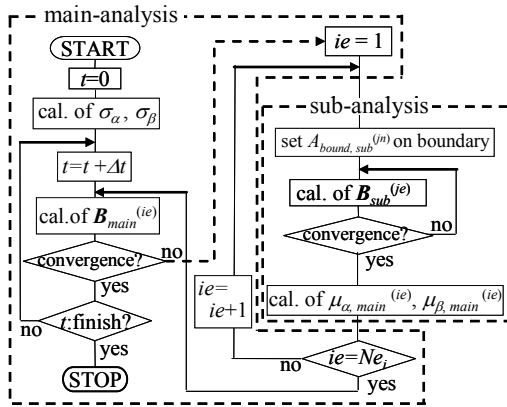


図2 フローチャート

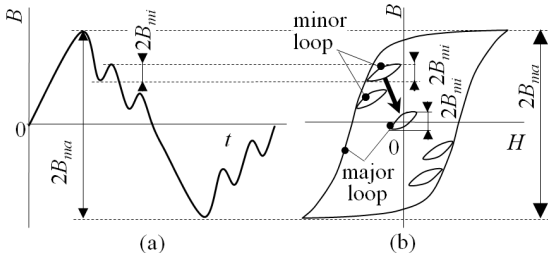


図3 ヒステリシス損失の算出法, (a) 磁束波形, (b) ヒステリシス曲線

(2) 現行リアクトルの損失分布の解析

図4に示される現行形状のインバータ用単相リアクトルの解析モデルに、図5に示される実際のインバータ電源から生じる高調波成分を含む電流波形を与えた場合の、損失計算

を行なった。

図6に、積層鉄芯の積層構造を無視した従来の磁界解析法と本研究で用いる積層構造を考慮した解析法によって得られた磁束分布を示す。今回、積層構造を考慮して磁界解析を行うことにより、鉄芯間に大きなギャップを有するリアクトルでは、鉄芯角部に集中する磁束が鋼板間のギャップの磁気抵抗および鋼板中の渦電流により、鉄芯内部に浸透できず、鉄芯表面に偏ることが明らかとなった。

図7に、損失分布を示すが、鉄芯中のヒステリシス損は磁束が大きくなる鉄芯表面で、また、渦電流損は鉄芯角部で大きくなり、さらに押え板でも鉄芯のギャップ近傍で大きな渦電流損が発生することが明らかになった。

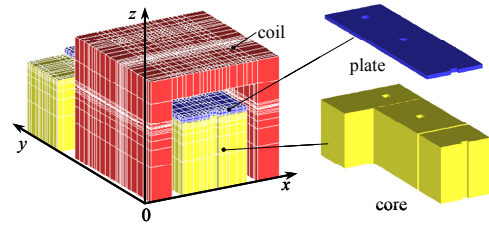


図4 単相リアクトルモデル (従来型)

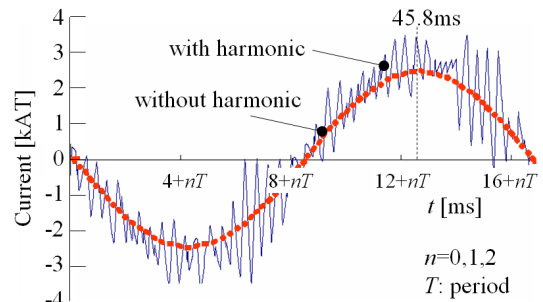


図5 電流波形

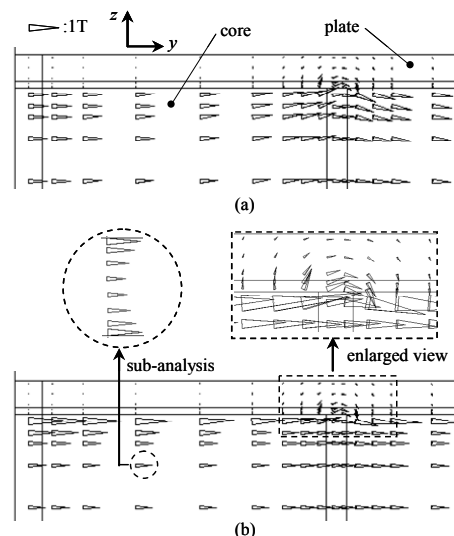


図6 磁束分布 (従来型), (a) 積層構造無視, (b) 積層構造考慮

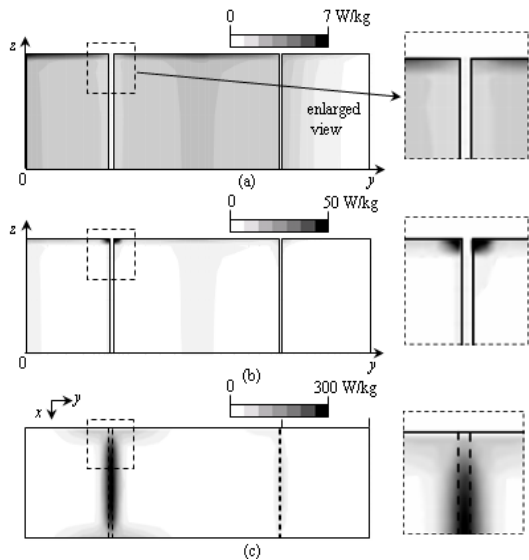


図7 損失分布 (従来型), (a)鉄芯中のヒステリシス損, (b)鉄芯中の渦電流損, (c)押え板の渦電流損

(3) 損失低減のための改善設計

項目(2)の磁束および損失分布の結果から, 損失を低減する改善設計として, 図8に示すように, 鉄芯の角部にテーパ, 押え板にスリットを設けた構造を考え, それらの最適な寸法を解析と試作実験により求めた。

改良型の磁束分布を図9に示すが, 従来型鉄芯形状で生じた表面の磁束の偏りが緩和され, また, ギャップの漏洩磁束も小さくなっていることがわかる。

改良型の損失分布を図10に示すが, 従来型で大きな損失が発生していた箇所の損失が低減できていることがわかる。

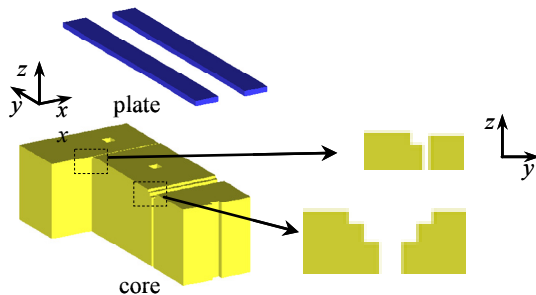


図8 鉄芯および押え板の形状の改善

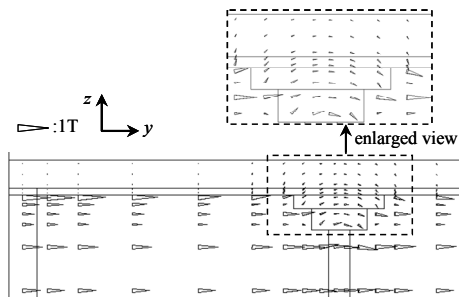


図9 磁束分布 (改良型)

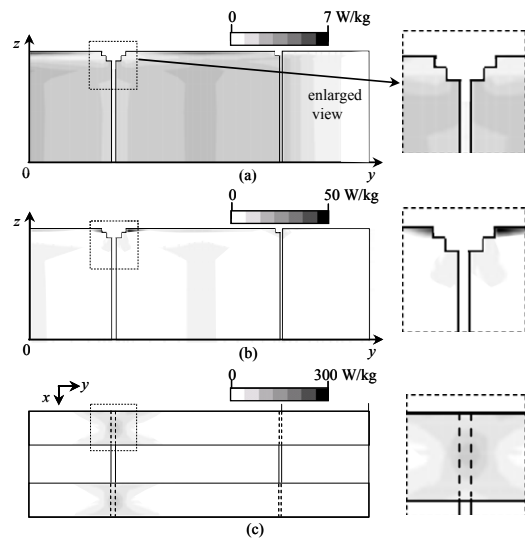


図10 損失分布 (改良型) (a)鉄芯中のヒステリシス損, (b)鉄芯中の渦電流損, (c)押え板の渦電流損

(4) 実機三相リアクトルによる検証実験

図11に, 従来型と改良型形状を有する実機の三相リアクトルの解析で得られた各要因別の損失と実験で得られた全鉄損を示す。

実測において, 改良型の全鉄損は従来型の約半分に低減でき, 本研究で提案した鉄芯と押え板の形状は実機でも損失の低減効果があり, 本損失計算法を用いた設計手段は有効であることが確認できた。

解析と実験結果を比較すると, 全鉄損の解析値と実験値は2倍程度異なっている。これは, 解析において, 磁壁の移動によって生じる異常渦電流損が考慮されていないためと考え, 本研究では, 損失計算法の改善のため, 異常渦電流損の考慮法についても検討した。

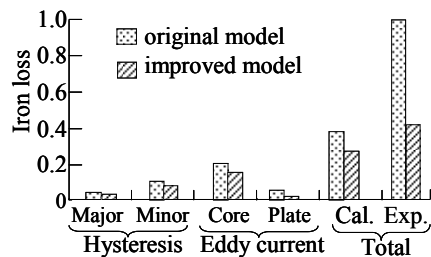


図11 損失の解析と実測の比較(異常渦電流損無視)

(5) 損失計算法の改良

項目(4)で明らかになった解析で得られる損失値の誤差を改善するため, 損失計算法で異常渦電流損を考慮する方法について検討した。考慮法としては, 磁壁移動を考慮して渦電流を計算する物理モデルと, 鋼板の導電率を大きくすることにより異常渦電流損による損失の増加を考慮する数値モデルの二通りを検討した。物理モデルを用いる場合には, 計算結果を素材の鉄損特性と一致させる

ためには、詳細なモデリングが必要となり、この計算を塊状鉄芯モデルの要素毎に行うことは、計算時間の観点から得策ではないと考え、また、図 12 に示すように、簡便な数値モデルでも素材の鉄損特性を広い範囲で再現できることが明らかになったため、本研究では、数値モデルを採用した。

図 13 に、素材の鉄損曲線と一致するように鋼板の導電率を大きくして、リアクトルの損失計算を行なった場合の結果を示す。この図より、鉄芯中の磁束がほぼ均一になる改良型リアクトルでは、解析値と実測値がほぼ一致し、異常渦電流損を考慮した損失計算法の妥当性がわかる。しかしながら、鉄芯表面の磁束が大きくなる従来型では、計算精度は十分に改善されていない。これは、マイナーループによるヒステリシス損をメジャーロープの損失で近似する計算法は、磁束密度が高い領域で誤差が生じるためであると考えられ、今後、さらに詳細な検討を行う予定である。

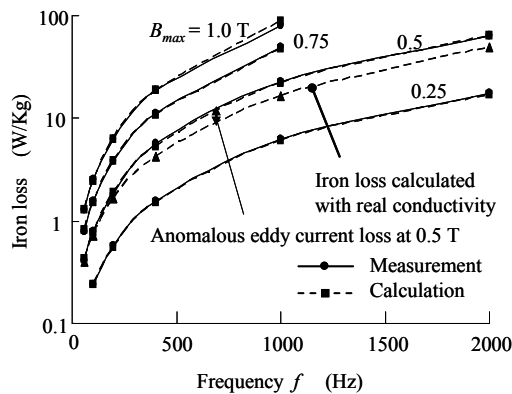


図 12 異常渦電流損を考慮して得られた鋼板の鉄損曲線

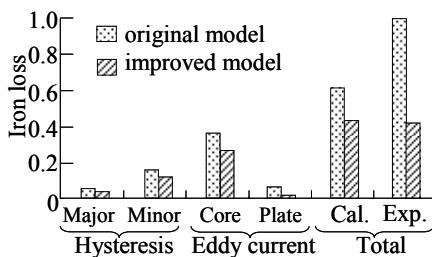


図 13 損失の解析と実測の比較 (異常渦電流損考慮)

(6) まとめ

本研究では、インバータ用リアクトルの小形・低損失化を目的とし、「鋼板中の渦電流を考慮した積層鉄芯の磁界解析法」を鉄損計算法に拡張し、これと試作実験により損失を

低減する鉄芯と押え板の形状を明らかにした。なお、福岡県産業・科学技術振興財団実用化 F S 事業により実機の三相リアクトルが製作され、損失が従来型の約半分に低減され、本研究で得られた鉄芯と押え板の形状とその設計方法の有効性が確認されている。また、損失計算法において異常渦電流損を考慮することにより、磁束密度が低い領域では、解析値と実測値が一致し、この領域での精度よい損失計算法が確立できた。磁束密度が高い領域での損失計算法については、今後、さらに検討する予定である。

(7) 得られた成果の国内外における位置づけ

本研究で開発された損失計算法により、インバータ用リアクトルで大きな損失が発生する箇所が示され、また、その改善設計により損失が半分に低減された成果は、本損失計算法を用いた設計方法の有用性および小形・低損失インバータ用リアクトルの開発の両面から、国内外で高く評価された。特に、国外においては、本研究成果がこの分野では世界で最も権威がある学術雑誌 IEEE Transactions on Magnetics に掲載されるなど高い評価を得た。

(8) 今後の展望

本研究で開発された小形・低損失リアクトルでは、従来型に比べて鉄芯中の磁束密度が高くなるため、磁気歪や電磁力により生じる振動による騒音が大きくなる。今後は、低騒音化についても検討し、本リアクトルの実用化を図りたい。また、磁束密度が高い領域でのマイナーループによるヒステリシス損の計算法についてもさらに詳細な検討を行ない、精度よい損失計算法を確立したい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Yanhui Gao, Kazuhiro Muramatsu, Koji Fujiwara, Shigemasa Fukuchi, Tetsumi Takahata, Loss analysis of a reactor under inverter power supply taking account of anomalous eddy current loss, Journal of the Magnetics Society of Japan VOL. 33, NO. 2, pp. 54-59, 2009, 査読有
- ② Yanhui Gao, Kazuhiro Muramatsu, Katsunori Shida, Koji Fujiwara, Shigemasa Fukuchi, Tetsumi Takahata, Loss calculation of reactor connected to inverter power supply taking account of eddy currents in laminated steel core, IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 45, NO. 3, pp. 1044-1047,

2009, 査読有

[学会発表] (計 6 件)

- ① Yanhui Gao, Kazuhiro Muramatsu, Koji Fujiwara, Shigemasa Fukuchi, Tetsumi Takahata, Loss calculation of reactor under inverter power supply taking into account anomalous eddy current, The 62nd Joint Conference of Electrical and Electronics Engineers in Kyushu, no. 06-1P-01, Oita, 2008.9
- ② Yanhui Gao, Kazuhiro Muramatsu, Koji Fujiwara, Shigemasa Fukuchi, Tetsumi Takahata, Loss analysis of reactor under inverter power supply taking into account anomalous eddy current loss, The papers of Joint Technical Meeting on Static Apparatus and Rotating Machinery, IEE Japan, SA-08-81, RM-08-88, Oita, 2008.9
- ③ Yanhui Gao, Kazuhiro Muramatsu, Numerical modelling of anomalous eddy current loss in steel plate, The 32nd Annual Conference on MAGNETICS in Japan, No.12pE-7, Sendai, 2008.9
- ④ Yanhui Gao, Kazuhiro Muramatsu, Katsunori Shida, Koji Fujiwara, Shigemasa Fukuchi, Tetsumi Takahata, Loss calculation of reactor connected to inverter power supply taking account of eddy currents in laminated steel core, 2008 IEEE CEFC conference, no. PE-15, Athene Greece, 2008.5
- ⑤ Yanhui Gao, Kazuhiro Muramatsu, Katsunori Shida, Koji Fujiwara, Shigemasa Fukuchi, Tetsumi Takahata, Loss Reduction of Reactor Connected to Inverter Power Supply Using Magnetic Field Analysis, 2008 Annual meeting of IEE Japan, No.5-189, Fukuoka, 2008.3
- ⑥ Yanhui Gao, Kazuhiro Muramatsu, Katsunori Shida, Koji Fujiwara, Shigemasa Fukuchi, Tetsumi Takahata, Loss Analysis of Reactor Connected to Inverter Power Supply Taking Account of Eddy Currents in Laminated Steel Core, Joint Technical Meeting on Static Apparatus and Rotating Machinery, IEE Japan, MAG-08-31, SA-08-19, RM-08-19, Kyoto, 2008.1

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

該当無し

6. 研究組織

(1)研究代表者

村松 和弘 (MURAMATSU KAZUHIRO)

佐賀大学・理工学部・教授

研究者番号 : 30263627

(2)研究分担者

該当無し

(3)連携研究者

該当無し