

博士学位授与論文の内容の要旨
および審査の結果の要旨

博士学位授与論文の内容の要旨および審査の結果の要旨

成 蹊 大 学

学位規則（昭和 28 年 4 月 1 日文部省令第 9 号）第 8 条の規定による公表を目的として、本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨および論文審査の結果の要旨を次のとおり掲載する。学位記番号に付した乙は本学学位規則第 3 条第 4 項によるものである。

氏 名	奥野 晃康
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	乙第63号
学位授与年月日	2005年7月27日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当者
学 位 論 文 題 目	電力貯蔵用ナトリウム - 硫黄電池の開発と実用化
論 文 審 査 委 員	主査 尾崎 義治 委員 樋口 亜紺・小島 紀徳 安田 栄一（東京工業大学応用セラミックス研究所教授）

〔論文内容の要旨〕

本論文はナトリウム - 硫黄電池（NAS 電池）を電力貯蔵用二次電池として実用化する上で必要な要素技術開発に関するものである。電気は貯めることが出来ないものとして、発電所で作られた電気は送電線や変電所等の電力流通設備を通して需要地に送られ、瞬時に消費されてきた。しかし、電力需要は昼夜や季節によって変動し、安定な供給を行なうためには貯蔵システムの実用化が望まれている。学位申請研究はこのような要望に応えるとともに、社会的にも間接的なCO₂削減や電力システム障害に対する都市機能の脆弱性を補うものとして大きな貢献が期待できるものである。NAS 電池の基本動作原理は 1967 年に米国フォード社によって提案されたものであるが、電力貯蔵用二次電池として実用化したのは本研究が世界でも初めてのものである。

本論文は以下に示す 4 章から主に構成されている。

第 1 章「はじめに」では、開発の背景や歴史、NAS 電池の動作原理や特徴および電力貯蔵用二次電池として実用化する上での技術的課題などについて述べている。

NAS 電池は他の大容量二次電池に比べ、エネルギー密度が高く、高効率、長寿命な高性能二次電池であり、負荷の少ない夜間に電力を貯蔵（充電）し、電力需要が増大する昼間に使用（放電）することで、電力の負荷平準化を行うことができる。また、落雷等による瞬時電圧低下（瞬低）や停電発生時の非常用電源としても活用することが可能な大容量二次電池である。米国のフォード社が電気自動車用の電源として、その原理を発表して以来、世界各国の研究機関で鋭意開発が進められたが、その耐久性や安全性および経済性を達成することが出来ず、これまで実用製品の開発に至ったものはなかった。本研究開発では、このNAS 電池を電力貯蔵用二次電池として実用化するために、信頼度の高いセラミックス製の固体電解質を安価に製造する技術、および電力設備として長期耐久性と安全性を維持する上で必要な電解質シール技

術や電池構成材防食技術などを独自に開発するとともに、累計で約 30MW 相当のシステムを用いて、実フィールドでの技術検証を繰り返すことによって、それぞれの技術の完成度を向上させ、実用化に不可欠な信頼性と経済性を実現している。

第 2 章「実用化技術の開発」では、N A S 電池を実用化する上で必要な要素技術開発として、5 つのキーテクノロジー、ベータアルミナ管、セラミックス - 金属接合、正極、防食層、安全設計の開発成果について述べている。

ベータアルミナ管は、N A S 電池の心臓部とも言えるセラミックス製固体電解質を構成している。ベータアルミナ管は N A S 電池の正負極間のセパレータでもあるため、この耐久性は、電池の耐久性に直結するものである。そのため、本研究ではベータアルミナ管の耐久性を向上させることを目的に、出発原料中に含まれる不純物、Ca、K、Si、Fe 等が耐久性に及ぼす影響について評価し、各不純物元素の許容限界量を明らかにしている。その結果、特に Ca や K 等の軽元素不純物の管理によって、大幅にベータアルミナ管の寿命が改善されることを実験データで示している。また、ベータアルミナ管は単電池の内部抵抗の約 4 割を占めることから、電池性能を向上させるためには、ベータアルミナ管の低抵抗化も不可避な技術課題であった。この課題に対しては、結晶組成制御、粒界制御、結晶配向制御など、3 つの新たな制御技術を開発し、ベータアルミナ管の抵抗率を開発当初の 1/2 までに低減して、大幅な性能向上に結び付けている。

セラミックス - 金属接合は異種材料から構成される電池部分で使用され、N A S 電池の設計上、耐久性と安全性のうえから重要な技術開発課題である。物性の異なる α アルミナリングと金属部品との接合部には、金属ナトリウムと硫黄の酸化を防止するための気密性と、昇降温時に発生する応力や負極活物質の金属ナトリウムによる侵食に対して、15 年以上の耐久性が要求される。本研究では、これらの要求条件を満たすため、各種の接合方法について検討し、使用環境が約 300 と高いことや実用化技術としての経済性を考慮して、金属溶ダー法による熱圧接合技術を採用している。また、接合部の耐久性

については、耐金属ナトリウム侵食性試験や昇降温試験を繰り返すことで評価しており、接合条件や接合構造を最適化することで、電力設備として 15 年以上の耐久性を有する接合技術を確立している。

N A S 電池の正極材料は硫黄であるが、本研究で述べた実用に耐える正極構造の開発によって初めて商業的な成功に結びつけることができた。正極は単電池の内部抵抗の約 5 割を占めるとともに、電池の充電回復性を規定するなど、単電池の特性を大きく支配する要素である。N A S 電池の場合、正極反応はベータアルミナ管の外表面で選択的に起こるが、正極物質の硫黄には電子伝導性がないため、正極全体に電子を供給する媒体が必要となる。本研究では、正極反応を円滑に行わせるために、正極全体に電子伝導性を付与すると同時に、ベータアルミナ管の外表面に絶縁体である硫黄が析出するのを防止する正極構造が重要であることを明らかにした。すなわち、N A S 電池の性能低下が単なるオーミックな抵抗上昇によるものだけではなく、充電 2 相域においてベータアルミナ管の外表面に硫黄が析出することによって、充電回復率が低下することが容量低下の主要原因であることを突き止めている。この結果、正極物質の硫黄をグラファイトフェルトで担持し、更にそのベータアルミナ管に接する部分をガラス繊維で高抵抗化した正極構造の開発に成功した。

N A S 電池はその構成材料として腐食性の高い金属ナトリウムや硫黄を用いている。この点で電池容器に対する防食技術の開発は不可欠であった。電力貯蔵用の電池は長期間に亘って使用されるため、性能低下率の少ないことが要求される。しかし、放電することによって正極に生じる多硫化ナトリウムはとくに腐食性が強く、正極容器は厳しい腐食環境下に曝されることになる。また、正極容器は正極の集電体を兼ねているため、そこで形成される腐食生成物によって抵抗が上昇すると電池性能の低下を招くことになる。本研究では、この課題に対して検討を行い、耐食性に優れた正極容器の防食技術を確立している。一方、電池性能と防食層の関係についても深く検討しており、電池が性能低下を引き起こすメカニズムを明らかにしたことは学術的にも非常に価値のあるものである。

N A S 電池は電池の反応物質として活性な金属ナトリウムや硫黄を使用していることから、電池の実用化にとって、安全性の確立は最も重要な要素の1つであった。N A S 電池の安全設計には多重防護の考え方を採用しているが、基本構成となる単電池の内部に安全管を設けることで、万が一、ベータアルミナ管が破損しても内部の活物質を外に漏らさない設計を確立している点が注目される。N A S 電池の安全性については、強制的な破壊試験を含めて、繰り返しの検証が成されており、有識者や消防関係者が組織する専門委員会においてもその優れた安全設計が高く評価されているものである。

第3章「実用化技術の適用」では、第2章で述べている数々の要素技術開発によって実用化したN A S 電池の充放電性能や実際のN A S 電池システムの適用事例として、研究開発成果の活用実績を示している。用途別の適用事例としては、電力の負荷平準化を目的として都市近郊の需要地に設置される負荷平準化システムのほか、非常時の電源確保を兼ね備えた非常用電源兼用システムや、雷害等による瞬時電圧低下の影響が回避できる瞬低対策機能付きシステムに大別できるが、2004年9月末時点で既に70MWを超すN A S 電池システムが国内の各地で運転されるまでに至っている。また、N A S 電池の基本動作原理は米国で最初に提案されたものであるが、現在では逆に純国産技術として米国に輸出する段階に来ている。2002年9月には米国第一号機として、本技術を適用したデモシステムがA E P（アメリカン・エレクトリック・パワー）社に導入されており、今後、米国をはじめとする海外でもN A S 電池の活用が大いに期待されている。

第4章「まとめ」では、本技術の開発と実用化による社会的貢献度として、以下の5つの導入効果について述べている。

1) 負荷率の改善

日本の電力系統の年負荷率は欧米主要国に比べると低く、電力が高コストである構造要因の一つであり、その改善が重要な課題となっている。また、負荷率の向上は、送配電損失の低減や発電効率の向上等による省エネルギーと非化石エネルギーの比率が高い深夜電

力の活用により、電力系統全体でのCO₂排出抑制に資するものである。N A S 電池は、あらゆる電力需要に対応できることから、その導入可能範囲は広く、飛躍的に負荷平準化を促進する可能性をもっている。特に、需要に対する時間的・量的追従性が高いため、I T 化の進展により電力需要が急増する可能性等、将来の見通しに関する不確実性が大きくなる中で、今後の需要増加に柔軟に対応でき、過大な供給予備力を持つことなく、電力の安定供給を確保することが可能になると考えられる。

2) 電力品質の向上

I T 化の進展等により、オフィスビルや工場を中心に、より高い電力品質が求められるようになってきている。前述のように、N A S 電池は無停電電源装置(UPS)の機能を容易に付加でき、また非常用電源(EPS)としても使用できることから、通常は負荷平準化用として使いつつ、緊急時にUPSやEPSとして機能させることで、電力品質向上のニーズにも対応することができると考えられる。

3) 環境負荷の低減

近年、電力コスト低減の観点から、ディーゼルエンジンやガスタービンによる自家発電の導入が進んでいるが、環境対策面の課題(CO₂排出、NO_x等の大気汚染、PM(粒子状物質)の発生、低周波公害等の健康被害等)が顕在化しつつあることに加え、エネルギー効率の低下など省エネルギー政策面でも問題が指摘されている。N A S 電池はこのような自家発電の代替となることから、石油消費の削減、CO₂の排出抑制とともに、NO_x、SO_xの排出削減も可能であると考えられる。

4) 電力系統の安定化および自然エネルギーの導入促進

電力系統においては、負荷の急変で周波数や電圧が変動し、不安定になる場合がある。2003年8月に発生した米国北東部の広域停電は電力系統の不安定現象が原因ではないかと推測されているが、需要中心部にN A S 電池が広く普及すれば、応答の高速性や出力範囲の広さから、系統の安定性に大きく貢献するものと期待されている。さらに、N A S 電池を出力が不安定な風力等の自然エネルギーと組み合わせることにより、

自然エネルギーの出力安定化が図られ、自然エネルギーの導入促進にも寄与することができると考えられる。

5) ベース電源の形成

需要サイドでの上述したような効用に加え、まとまった量のN A S電池が導入されると、供給サイドとしても電源計画にあたっての選択肢を拡げることができるようになる。また、ピーク対応のために低稼働率の電源を作ることによって、N A S電池でピークシフトして原子力等のベース電源で対応するという選択も出来るようになる。これにより中長期的な需給計画の中でも化石燃料依存を低下させていくことが可能となるため、ベース電源の形成に対しても寄与は大きいものと考えられる。

以上のように、N A S電池の活用による社会的貢献度は大きく、今後、益々その有効活用が広がっていくものと期待される。本論文ではこのN A S電池を実用化するために不可欠であった要素技術開発を行ったものであり、これまで海外を含めて多くの研究者達が成し得なかった電力貯蔵用二次電池としての実用化を世界で初めて成し遂げたことは、極めて工学的価値の高い研究であると言

える。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文に十分値するものと認める。

〔論文審査の結果の要旨〕

本論文は、ナトリウム - 硫黄電池 (N A S電池) を電力貯蔵用二次電池として実用化する上で必要な要素技術開発に関するもので、信頼度の高いセラミックス製の固体電解質を安価に製造する技術、電力設備として長期耐久性と安全性を維持する上で必要な電解質シール技術や電池構成材防食技術などを開発するとともに、累計で約30MW相当のシステムを用いて、実フィールドでの技術検証を繰り返すことによって、それぞれの技術の完成度を向上させ、実用化に不可欠な信頼性と経済性を実現したもので、その工学的価値は非常に高いものである。

また、論文審査に当たっては、各審査委員がそれぞれの専門の立場から本学位申請者に対して口頭試問を行なった。その結果、本学位申請者の学位論文の内容および関連分野に関する知識と学力は博士(工学)を受けるに十分な基準を満たしているものと認定した。