

社会インフラ向け 大規模蓄電池システムを支える 基幹コンポーネント

Components for Large-Scale Battery Systems Applied to Social Infrastructure Systems

小杉 伸一郎 岡部 令 黒田 和人

■ KOSUGI Shinichiro ■ OKABE Ryo ■ KURODA Kazuto

近年、充放電に伴うエネルギー損失が小さいリチウムイオン電池を用いた、大規模な蓄電池システムが脚光を浴びている。

東芝が開発した二次電池 SCiB™ は、電池セル（以下、セルと略記）の外部から制御することができない電池の内部短絡による発煙や発火の危険性を本質的に取り除いているため安全性が高く、広い充電率（SOC：State of Charge）の範囲で内部抵抗が非常に低いことから総合的な充放電効率も高い。更に1万回もの充放電に耐えるなど長寿命であるため大規模な蓄電池システムに適した電池である。

今回当社は、社会インフラ向けの大規模な蓄電池システムを容易に構築するため、多数個の SCiB™ 20 Ahセルを組み合わせた電池モジュールや、セルの電圧と温度の情報を収集して蓄電池システムを制御するためのバッテリーマネジメントユニット（BMU）、メインコンタクタ、電流センサ、ヒューズ入りサービスディスコネクトなどの基幹コンポーネントを製品化した。また、システムの運用計画を事前に検討できる蓄電池シミュレータを開発した。

Large-scale battery energy storage systems equipped with lithium-ion battery (LiB) modules have become a focus of attention in recent years due to their small charge-discharge energy loss.

The SCiB™ battery, a rechargeable LiB developed by Toshiba, offers high safety by intrinsically eliminating the risk of smoke or fire even in the event of an internal short circuit, while providing high charge-discharge efficiency as a result of its low internal resistance through a wide state of charge (SOC) range, and a long life of 10,000 charge-discharge cycles. These features make the SCiB™ battery suitable for use in large-scale power storage systems. To facilitate the installation of large-scale power storage systems for social infrastructure systems, we have developed the main components for such battery systems including a 1.1 kWh battery module composed of 20 Ah SCiB™ battery cells, a battery management unit (BMU) to control the battery system based on collected information on the cell voltage and temperature data of the battery modules, a main contactor, a current sensor, and a service disconnect with fuses. We have also developed a battery simulator for the planning of optimal battery systems.

1 まえがき

近年、化石資源の枯渇を解決するための対策として、太陽光や風力などの再生可能な自然エネルギーを利用した発電に注目が集まっている。しかし太陽光や風力などの自然エネルギーは天候に依存して発電出力が変動し、太陽光電池や風車などの単体では発電出力を制御することができないため、電力需要に応じて電力を供給することはできない。そのため、電力系統に接続可能な自然エネルギーによる発電の規模には制限がある。したがって、無尽蔵に存在する自然エネルギーを利用した発電の規模を拡大していくためには、自然エネルギー由来の電力をいったん蓄電し、電力需要に応じて使用するための大規模な蓄電池システムが必要になる。大規模な蓄電池システムは電力供給の信頼度の強化や、周波数変動の抑制、防災、エネルギー利用効率の向上などの目的でも有効に活用することができる。そのため、エネルギー密度と充放電効率が高いリチウムイオン電池への期待が高まっているが、前述のような社会インフラ・産業分野でのリチウムイオン電池の適用にはいくつかの課題がある。

社会インフラ・産業分野向けの蓄電池システムでは、大電力容量の貯蔵、電圧と蓄電池容量に対するスケーラビリティ、高い安全性、高い充放電効率、及び長寿命が求められており、蓄電池容量としては数10 MWhもの大規模な蓄電池システムが必要とされている。東芝製 SCiB™ 20 Ahセルの公称電圧と公称容量はそれぞれ2.3 Vと20 Ahであり、蓄電池容量としては約50 Whである。例えば、10 MWhの蓄電池システムを構築するには20万個もの SCiB™ 20 Ahセルが必要になり、高い信頼性で大量のセルを接続した蓄電池システムを構築するための仕組みが必要になる。また安全性もより重要になる。

当社の SCiB™ は、電池の内部短絡による発煙や発火の危険性を本質的に取り除いているが、著しい過充電や高温条件では電池が熱暴走に至るおそれがある^{(1),(2)}。また、適正な使用条件から逸脱すると電池劣化が加速し、電池寿命は短くなる。長期間にわたって電池を安全に使うためには、大量のセルを監視し制御する技術が重要になる。更に、適切な蓄電池システムを計画するには、電池に求められる充放電電力のプロファイルと使用条件に対する電池の劣化を計算し、所定の使用期間について期待した電力の充放電が可能かどうかを予

測するシミュレーション技術も必要になる。

ここでは、社会インフラ・産業分野において前述の課題を解決する蓄電池システムを構築するための電池モジュール、セルの電圧と温度の情報を収集して蓄電池システムを制御するためのバッテリーマネジメントユニット (BMU) などの社会インフラ向け大規模蓄電池システムの基幹コンポーネントと蓄電池シミュレータについて述べる。

2 SCiB™を用いた蓄電池システムの基幹コンポーネント

社会インフラ・産業向け蓄電池システムの基幹コンポーネントの主な仕様を表1に、1.1 kWh電池モジュールの外観を図1に示す。

アプリケーションごとに異なる電圧や電池容量に柔軟に対応するために、蓄電池システムの基幹コンポーネントは蓄電池容量1.1 kWhの電池モジュール、BMU、コンタクト、電流センサ、ヒューズ入りサービスディスコネクト、及び接続ハーネスから構成されている。システムインテグレーターは、これらの基幹コンポーネントを組み合わせることで、必要な蓄電池システムを構成することができる。



図1. 1.1 kWh電池モジュール — 2並列12直列に接続したセルとセル監視基板を搭載した蓄電池容量1.1 kWhの電池モジュールである。
1.1 kWh battery module

2.1 電池モジュール

社会インフラ向け電池モジュールは、SCiB™ 20 Ahセルを2並列12直列に接続して充放電のための端子台を設け、セル監視基板 (セルモニタリングユニット:CMU) を搭載してモジュール化したものである。電池モジュールの公称容量は40 Ah、公称電圧は27.6 V、蓄電池容量は1.1 kWh、質量は約14 kgである。質量が約14 kgに抑えられているのでひとりで設置作業が可能であり、狭い場所でも容易に設置作業ができる。

この電池モジュールは並列接続、及び22直列までの直列接続に対応しており、必要な容量と電圧が得られるように組み合わせることができる。例えば、電池モジュールを22直列に接続した電池ユニットを413ユニット並列に接続すると、蓄電池容量10 MWhの蓄電池システムを構築できる。端子台は電池モジュールの短側面に設けられており、設置方向に関わらず最短距離で電池モジュール間を直並列に接続できる。

電池モジュールの接続抵抗の低減と高い接続信頼性を確保するために、セル端子とバスバーはレーザ溶接で接続されている。この電池モジュールでは、内部のセルどうしはバスバーで並列に接続されているので、内部の電流路は完全に二重化されている。高電圧の回路を構成した場合、放電中に電流路が断線するとその両端に異常な電圧が発生し、監視回路を焼損するおそれがある。しかし、この電池モジュールでは電流路が二重化されているため、たとえセル内外の電流路の1か所が断線しても電流路が切断されることはなく、異常な電圧が発生することもない。接続信頼性が高いレーザ溶接を採用し、更に電流路を二重化することにより、この電池モジュールの出力電圧と電池監視の信頼度が確保されている。電池モジュールの外部は、電池盤内で金属製の台に直接電池モジュールを設置できるようにするとともに、取扱い時の安全性を考慮してプラスチックケースで完全に覆って絶縁している。

CMUは全セルの電圧、セル温度を代表する位置6か所の温度を測定し、BMUに測定結果と接続位置情報をCAN (Controller Area Network) 通信で通知する。温度測定位置

表1. 蓄電池システムの基幹コンポーネントの主な仕様
Specifications of main components for large-scale battery systems applied to social infrastructure systems

コンポーネント	項目	仕様
電池モジュール	公称電圧	DC 27.6 V
	公称容量	40 Ah
	許容電流 (連続)	120 A
	最大許容電流	160A - 100秒
	電池電圧範囲	18.0 ~ 32.4 V
	セル構成	2並列12直列
CMU	機能	<ul style="list-style-type: none"> セル電圧と温度の測定 セルバランス動作 CAN による外部通知 UART による ID 自動付番
	計測電圧精度	±10 mV以下
	温度測定精度	±2℃以下
BMU	通信機能	CAN通信で電池状態を通知
	セルバランス機能	放電指令をモジュールへ出力
	電池状態の推定機能	放電可能な容量を算出して通知
	フェールセーフ機能	故障検出と主回路閉鎖
メインコンタクト	接点定格容量	DC 800 V - 100 A
電流センサ	計測範囲 (ch1)	-30 ~ 30 A
	計測分解能 (ch1)	37.5 μA
	計測範囲 (ch2)	-350 ~ 350 A
	計測分解能 (ch2)	439 mA
サービス ディスコネクト	主回路の定格電圧	DC 750 V
	主回路の定格電流	100 A (最大 120 A)

DC : 直流
ID : 識別番号
UART : Universal Asynchronous Receiver Transmitter
ch : チャネル

は、内部短絡などによりどのセルが温度異常を起こしても検出できるように選定されている。またCMUは、BMUからの指示電圧になるようにセルバランス調整を行う。セルバランス調整は、セル電圧がBMUの指定電圧になるように電圧が高いセルを放電し、電池モジュールの実効容量の最大化を図っている。

2.2 BMU

一般の炭素系負極を用いたリチウムイオン電池と同様にSCiB™も著しい過充電や高温条件では熱暴走するおそれがあるため、安全性を確保するための保護装置が必要である。また、PCSなどの上位装置が適切に電池から放電電流を引き出したり、電池を再充電したりするには、蓄電池システムの運転状態や、電池の充電率(SOC: State of Charge)、電池温度などの情報が必要になる。更に、多数の電池を直列に接続した蓄電池システムにおいて、電池の容量を有効に利用するにはセルの充電状態がそろっている必要がある。

一方、セルや電池モジュールをはじめ、監視システムの故障検出もシステムを安全に運転するために不可欠である。開発した基幹コンポーネントの一つであるBMUは、前記の保護機能と上位装置への電池情報提供機能のほか、セルバランス調整、及び蓄電池システムの故障検出機能を備えている。

BMUは、電池ユニット(1～28個の電池モジュールを直並列に組み合わせた制御単位)に対して1台設置され、電池モジュールから収集した電圧と温度が警告レベルに達すると上位装置に警報を出力する。更に保護レベルに達した場合には、独自の判断で電池ユニットの出力端に設けられたコンタクトを開いて電流を遮断して電池モジュールを保護する。過充電や過熱が原因の熱暴走は火災につながるおそれがあるので、上位装置の故障や通信線の断線を考慮して最終的な蓄電池の保護はBMUの判断で行う。最終的な蓄電池の保護は蓄電池のサプライヤーが提供するBMUが行うため、システムインテグレーターは安心して上位装置に接続できるという特長がある。

BMUは、起動時に故障診断を実施して上位装置を含めた全体システムの健全性を確認する。蓄電池システムの出力電圧と投入先の電力システムとの電圧差が大きいと過大な電流が流れるおそれがあることから、電圧差がしきい値以内であることも確認する。蓄電池システム全体の健全性、上位装置からの投入指示、及び蓄電池システムの出力電圧と投入先の電力システムとの電圧差がしきい値以内に入っていることが確認されるまでは、出力端のコンタクトを閉じないことで起動時の安全性を担保している。また運転中も異常時には、直ちに蓄電池システムを解列する仕組みになっている。

BMUと上位装置間の通信はCANで行われる。CANは差動通信でノイズに強く、物理規格だけでなく通信プロトコルも明確に定義されており、またCAN通信ができた時点で両方の

装置の健全性が確認できるため、CAN通信を採用している。BMUは一つのCANバスに対して16台を並列に設置することができ、CANバスを經由して上位装置であるPCSに運転に必要な最小限のデータだけを通知する。具体的には、コンタクトの開閉状態や、直列に接続されているセル電圧の和、セル電圧の最大値、平均値、及び最小値、セル温度の最大値及び最小値、電流、SOC、充電状態を示すフラグ、故障情報(BMUとモジュール故障、及び通信異常)などが通知される。

2.3 コンタクト、電流センサ、及びヒューズ入りサービスディスコネクト

蓄電池システムを構築するには、電池モジュールとBMU以外にもコンタクトや、ヒューズ、サービスディスコネクト、電流センサなどが必要になる。

コンタクトはヒューズが溶断する電流で溶着しないものが必要であるし、ヒューズは電池ユニットが外部短絡した場合に短絡電流を遮断できる特性と容量が必要である。そのため使用している電池モジュールの短絡時の特性に合わせた特性を持っている必要があり、更に外部短絡の確認試験も必要である。そこで、コンタクトとヒューズについても当社から専用品を提供している。

サービスディスコネクトは電池モジュールを組み込む場合や、蓄電池システムを取り外す際に安全のために電流路を遮断しておく断路器である。この断路器を蓄電池システムの使用中に引き抜くとアークによる感電や火傷のおそれがあるため、断路器に手を掛けて引き抜こうとしたときには電流を遮断する動作が必要である。BMUで引抜きを検出し電流を遮断するために、サービスディスコネクトに引抜き検出スイッチを組み込んである。また、電池モジュールの特性に合わせたヒューズもサービスディスコネクトに組み込み、専用品としている。

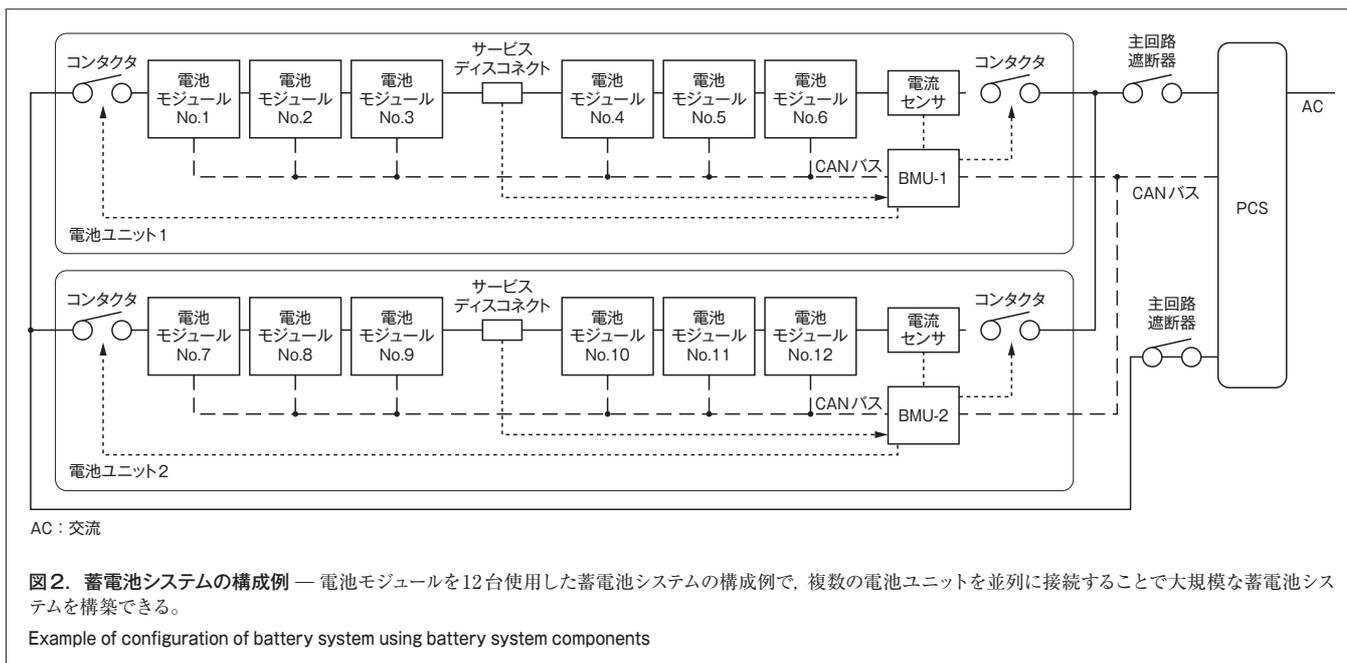
電流センサもBMUによるシステムの故障検出などの安全性に関わる判定に使用するため、専用品を提供している。

2.4 蓄電池システムの構成例と安全性

開発した基幹コンポーネントを使用した蓄電池システムの構成例を図2に示す。この例では電池モジュールを直列に6台接続して電池ユニットを構成し、その電池ユニットを2台並列に接続している。それぞれの電池ユニットには、コンタクト、ヒューズ入りサービスディスコネクト、BMU、及び電流センサを接続している。

電池ユニットは、それぞれに設けられたBMUにより独立して監視され保護される。巨大な蓄電池システムを構成する場合には、更に多くの電池ユニットを接続する必要がある。その場合、複数の電池ユニットをまとめて電池ブロックとし、その電池ブロックを統合制御してPCSなどの上位装置との通信を行うゲートウェイを設けるなどの階層構造をとることで、大型化にも対応することができる。

リチウムイオン電池では、電池内部に可燃性の電解液が含



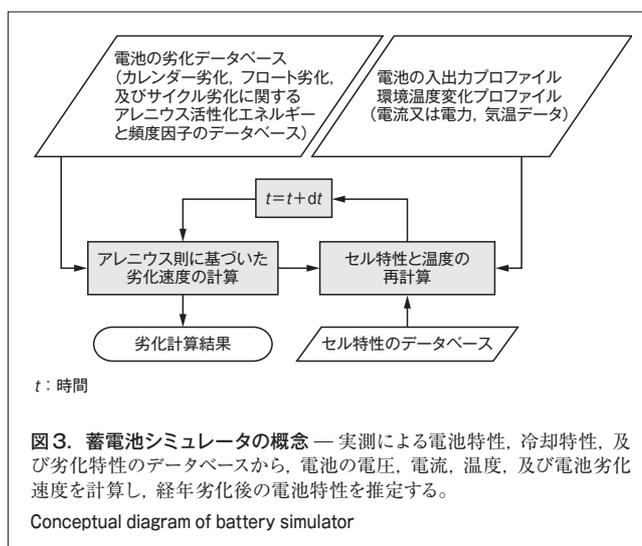
まれているため、大量の電池を使用する社会インフラ向けの蓄電池システムで注意をもっとも要するのは火災の防止である。セルは完全に密閉されているので電解液が漏れる心配はないが、電池が著しく過熱した場合には熱暴走などの危険な状態に陥るおそれがある。そこで、BMUは接続されている電池モジュールのセル電圧と温度を常時監視し、セルが安全な範囲を逸脱すると確実にコンタクタを開くことで、電池の過熱を防止し、安全な電圧と温度の範囲内で使われることを担保している。

しかし、図2からわかるようにセル内部の短絡はコンタクタによる電流遮断では効果がない。またこの電池モジュールでは、セルが並列に接続されているため並列接続されたセルから短絡セルにエネルギーが流入することも考えられる。そこでセルの内部短絡を電池モジュール状態で模擬し、満充電状態の電池モジュールの1セルだけに釘を刺しその後の温度上昇を測定した。その結果、釘を刺したセルの最高到達温度は100℃以下であり、熱暴走に至る温度に対して十分なマージンがあることを確認した。

更に電池モジュールには、外部短絡など異常な大電流によるセルの過熱を防止する大電流ヒューズ機能も備えられており、電池ユニット内部での短絡に対しても安全性が確保されている。

3 蓄電池シミュレータと寿命性能

電池は充放電を行うことで劣化し、また充電状態で単に放置してあっても緩やかに劣化する。電池は劣化することで電池容量が減少(容量劣化)し、内部抵抗も上がる(抵抗劣



化)。蓄電池システムは、劣化後の寿命末期でも所定の充放電電力プロファイルの充放電ができるように計画されるので、電池劣化の見積もりが蓄電池システムを計画するうえで必須になる。SCiB™ 20 Ahセルの劣化はアレニウス則に従うので、劣化試験結果から劣化の見積もりと劣化後のシステム性能の推定が可能である。

蓄電池シミュレータの概念を図3に示す。蓄電池シミュレータでは、電池特性、冷却特性、及び劣化特性のデータベースを用いて、電池の電流、電圧、発熱、温度、及び劣化を計算する。これらのデータベースは、全て実測した電池特性と高温での加速試験結果を整理することで作成した。

まず、劣化計算ではその瞬間の電池出力及び電池内部抵抗と開回路電圧(OCV)特性の電池特性データベースから、電

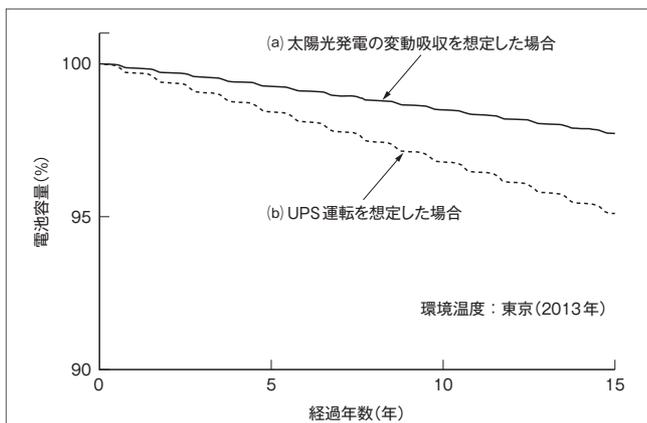


図4. 電池寿命の計算結果例 — 太陽光発電の変動吸収を想定した場合、及びUPS運転を想定した場合とも、15年後の電池容量の低下は5%以下と予測された（この図は、製品の保証値ではない）。

Example of results of battery degradation simulation

池電流及びSOCと電池発熱を計算し、計算した発熱と電池の冷却特性及び環境温度から電池の温度を計算する。

次に、劣化データベースからその瞬間の電池状態（SOCや、電池温度、電流など）に対応する劣化の活性化エネルギーと頻度因子を求め、アレニウス式を用いて劣化速度を計算する。電池に流れる電流の変化による発熱の変化、環境温度変化、及び抵抗劣化（内部抵抗の増大）による発熱と温度上昇によって電池温度は常に変化し、電池の劣化速度も電池温度に応じて変化する。この劣化速度を時間積分することで、任意の時間経過後の電池容量と内部抵抗が計算される。劣化後の電池容量と内部抵抗に対して、電池の入出力プロファイルに対する蓄電池システムの出力電圧や電流など電池の挙動を計算することで、計画した蓄電池システムの容量で所定の期間システムを運用可能かどうかの事前検討ができる。

劣化計算結果の一例として、この蓄電池モジュールを太陽光発電の変動吸収を想定して日中20 Arms (0.5 C) の電流を連続的に流した場合と、無停電電源システム (UPS) 運転を想定して通常時はフロート充電し、1日1回20 Arms (0.5 C) 放電を1時間行った場合の劣化計算結果を図4に示す。電池の環境温度は、気象庁による2013年の東京の温度観測結果を使用した。太陽光発電の変動吸収あるいはUPS運転を想定したどちらの場合も、15年経過後の電池容量の低下は5%以内にとどまっている。SCiB_{TM}が電力の貯蔵などの用途で要求される寿命性能を満足していることがわかる。

4 あとがき

当社のSCiB_{TM}は、広いSOCの範囲において出力特性が優れており、セルが満充電状態で内部短絡しても熱暴走などの危険な事象を起こさない。また寿命性能にも優れるため、社会インフラ向けに要求される電力貯蔵システムに適した電池である。

今回当社は、大規模な蓄電池システムを容易に構築するための1.1 kWh電池モジュールや、電池を安全に使うためのBMU、コンタクタなどの基幹コンポーネントをシステム組込み用として製品化した。これらは大規模蓄電池システム用途として提供を開始したが、今後は大規模蓄電池システム用途以外にも、システム組込み用の電池製品群を提供していく。また電池の健全性の診断技術⁽³⁾も、様々な蓄電池システムに導入していく。

文 献

- (1) 小杉伸一郎 他. 安全性に優れた新型二次電池 SCiB_{TM}. 東芝レビュー. 63, 2, 2008, p.54 - 57.
- (2) 小杉伸一郎 他. HEV用 新型二次電池 SCiB_{TM}電池パック. 東芝レビュー. 64, 6, 2009, p.44 - 47.
- (3) 森田朋和 他. 内部状態の推定により電池の健全性を可視化する充電曲線解析法. 東芝レビュー. 68, 10, 2013, p.54 - 57.



小杉 伸一郎 KOSUGI Shinichiro, D.Eng.

社会インフラシステム社 府中社会インフラシステム工場 計測制御機器部主幹、工博。蓄電池応用機器の設計・開発に従事。

Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems



岡部 令 OKABE Ryo

社会インフラシステム社 府中社会インフラシステム工場 計測制御機器部主務。蓄電池応用機器の設計・開発に従事。

Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems



黒田 和人 KURODA Kazuto

社会インフラシステム社 府中社会インフラシステム工場 計測制御機器部主務。蓄電池応用機器の設計・開発に従事。

Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems