

# 2023年度 第2回エネルギー講演会 みんなで考えよう!! 明日のエネルギーと原子力



## 鷲尾 方一氏 プロフィール

東京大学工学部原子力工学科卒、同大学院修了。日本原子力研究所(現・日本原子力研究開発機構)研究員、東京大学工学部附属原子力工学研究施設助手、住友重機械工業主任研究員を経て、早稲田大学理工学術院総合研究所教授に就任。日本放射線化学会常任理事、日本加速器学会評議員、高エネルギー加速器研究機構客員教授などを歴任。第16回りそな中小企業優秀新技術・新製品賞、産学官連携特別賞、日本放射線化学会学会賞を受賞。



## 三田 裕一氏 プロフィール

早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修了。一般財団法人電力中央研究所に入所し、主に電力貯蔵技術、二次電池劣化の研究を担う。以降、新エネルギー・産業技術総合開発機構で分散型電池電力貯蔵技術開発や次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発に携わる。現在は電力中央研究所エネルギートランスフォーメーション研究本部 研究統括室兼 エネルギー化学研究部門兼 グリッドイノベーション研究本部ENIC研究部門上席研究員として、各種定置用蓄電池の性能評価試験やリチウムイオン電池加速劣化試験・劣化評価研究に従事。

2023年10月17日に、一般社団法人九州経済連合会と一般社団法人日本原子力学会九州支部は2023年度第2回エネルギー講演会を開催しました。早稲田大学理工学術院総合研究所教授の鷲尾方一氏には危険というイメージが先行する放射線について産業や農業、医療などの分野で活用される放射線応用技術を、そして一般財団法人電力中央研究所上席研究員の三田裕一氏にはカーボンニュートラルに向けて期待される蓄電池をテーマにご講演いただきました。高い見識を持つお二人の講演に133名が聞き入りました。

## < 開催概要 >

- ◆開催日時：2023年10月17日(火) 14:00～17:00
- ◆開催場所：電気ビル共創館3階 カンファレンスA
- ◆参加者：133名
- ◆主催：一般社団法人九州経済連合会、  
一般社団法人日本原子力学会九州支部
- ◆後援：福岡県教育委員会、福岡市教育委員会、  
福岡経済同友会エネルギー・環境委員会

## 産業・暮らしを支える放射線応用技術

鷲尾 方一氏

## 放射線発見から放射線応用技術の社会実装まで

◇まずは放射線応用技術がどうやって社会実装されてきたのかを、歴史から紐解いていきたいと思います。いまから約130年前、ヴィルヘルム・レントゲンのX線発見を皮切りに、ジョゼフ・トムソンの電子発見、アーネスト・ラザフォードのアルファ線発見など、さまざまな発見がありました。そしてこれらの発見が相次ぐ中で加速器が発達していきました。1930年代には直線で粒子を高速で動かす線形加速器、円形の軌道となったサイクロトロンや電場を利用した静電型加速器が次々と開発されました。それまでひとつの実験データを採取・記録するのにも数ヶ月以上を要していた原子核研究ですが、加速器により実験が大幅に効率化され、原子核物理の研究が大きく進展しました。

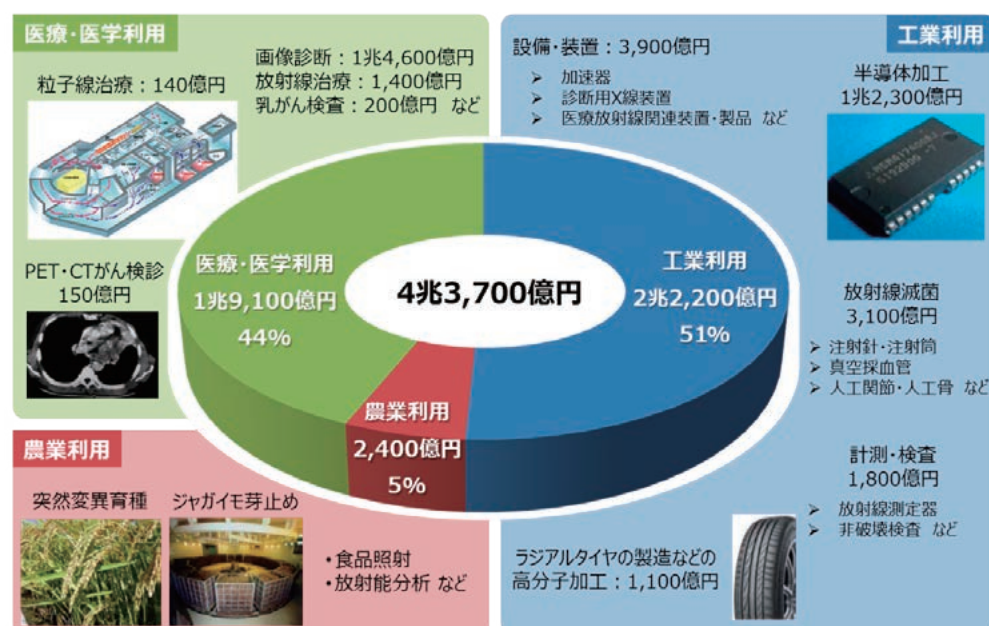
◇これ以降、放射線研究の成果が産業界に大きな影響を与えました。英国の研究者アーサー・チャールズビーは、原子炉内でポリエチレンに放射線を照射し、これが不融不溶となることを発見し、放射線による新たな可能性を導き出しました。放射線により、ポリエチレンでは架橋というネットワーク構造を形成し機械的特性が向上していたことを見つけたのです。彼はこの現象を詳細に解析し、理論体系を構築しました。その研究成果は1957年以降の大きな産業革命につながっていきます。特にポリエチレンの熱収縮チューブが商品化され、これ以降もチャールズビーの理論をもとに放射線を活用して、さまざまな製品や材料の性能向上に貢献していくことになりました。

◇日本国内に目を向けると、1963年に日本原子力研究所(現QST高崎)が開設され、以降、放射線利用についてさまざまな研究・開発が行われました。1970年代には放射線照射技術の応用がさらに進み、多くの分野で利用が始まりました。具体的には自動車用タイヤの高性能化、プラスチック

発泡剤の開発、素材の硬化プロセスの実用化などが挙げられます。それ以外にも放射線を活用した滅菌について法整備がなされたほか、北海道ではジャガイモの発芽防止が行われるなど、画期的な産業技術が生まれていきます。1973年には日本メジフィジクス株式会社という会社が設立され、これにより日本における放射性医薬品の供給が可能となりました。

◇1990年代に入ってから多様な放射線照射による素材加工プロセスが実用化されました。加速器は

## 2015年度の放射線利用の経済規模



※出典：内閣府HP

半導体の製造、テフロン分解技術、ボタン電池の製造、高機能グラフト膜の開発など、様々な技術に貢献しています。特筆すべきは高機能グラフト膜で、福島原発事故の際にセシウムの除染に使用されるなど、その応用範囲は広がっています。さらに2000年代以降は医療用具や点眼薬、ペットボトルなどの放射線滅菌が行われるようになり、放射線応用技術の経済規模は大きく拡大していきます。2015年時点でその利用分野は半導体加工を中心とした工業利用が51%、医療・医学利用が44%、残りの5%ほどが農業利用で、規模は4兆3,700億円に上ります。

## 電子線やX線、イオンビームなどの放射線応用技術

◇電子線加速器などを使用し放射線照射等を行い素材の性質を改善することで新しい機能を組み込む技術が実用化されています。そのひとつが“はしかけ技術”と言われるもので、その技術を利用して造られた代表的な製品が自動車のエンジンルームに使われる耐熱性を向上させた電線です。加速器を通過させて電子線を照射するだけで、電線に耐熱性能を持たせることができます。また電子線を使って材料に別の性質を追加することも可能です。この技術を“グラフト”と呼びますが、水の吸収機能や脱臭機能、材料の難燃性機能、形状回復機能などを追加することができます。これらのプロセスは、電子線を材料に照射し、望む機能を持たせたい物質と接触させるだけで行うことが可能です。また、電子線を照射することによって強化繊維に用いられる炭化ケイ素の耐熱性が摂氏1,500℃以上となったり、樹脂をコーティングし素材を保護したりすることもできます。電子線は医療用器具やペットボトルなどの滅菌・殺菌にも活用されています。このように放射線応用技術活用の裾野は広がっています。

◇X線やイオンビームもいろいろな技術に応用されています。X線は医療分野での診断や治療などにも使われていますが、細かい加工にも使われています。例えばマイクロフィルターやマイクロギアといった微細な部品加工はX線が得意としているところです。イオンビームは自動車のエンジンを構成するピストンリングやエンジンバルブの摩耗測定に活用されています。また農業用植物の品種改良にも取り入れられています。イオンビームを当てることによって意図的に突然変異を起こさせ、いろいろな色の菊の花の開発や清酒醸造用酵母の品種改良にも使われています。

◇このように多くの場面で活用されている放射線応用技術は、放射線がエネルギーを与えるのは電子そのものですから、薬品や熱による反応に比べて桁外れに効率が良くなります。結果、プロセス時間が短く非常にエネルギー消費が少ないというメリットがあります。加えて、公害対策がほとんど不要です。また反応の自由度が高いほか、反応させる素材の色などにも影響しません。このように手間やコストなどの点から鑑みても放射線応用技術の効果は計り知れません。

◇逆に、さまざまな応用技術を可能にした放射線が活用できなくなるとどうなるのかについて考えてみます。まず、半導体、自動車、ボタン電池等の製造ができなくなることが挙げられます。また、病気の診断や治療に大きな影響を及ぼします。大型構造物の非破壊検査もできず、滅菌済み医療用具の品不足、ペットボトル飲料の生産問題など、いまの生活を維持すること自体が大変難しくなってしまいます。そのため放射線応用技術の重要性を理解し、適切に運用していかなければならないのです。

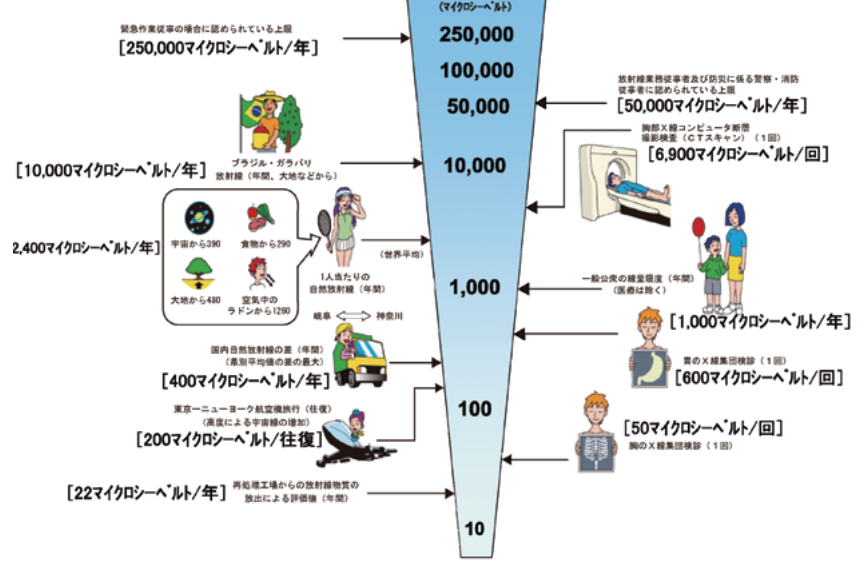
## 自然界にも多く存在する放射線と医療利用される放射線

◇健康被害などのリスクが注目されがちな放射線ですが、自然界にも「自然放射線」が存在し、私たちは日常生活の中で無意識のうちに触れています。代表的な自然放射線として太陽光があります。その中で、UV(紫外線)は日焼けの原因となり、皮膚への影響があることは周知のことと思います。気象庁が発表しているUVインデックス指標が8を超えると、非常に強いUV放射量であることを示しています。

◇当然、太陽光以外にも放射線は存在し、さまざまな形で影響を受けています。カリウム40、ウラン238、トリウム232などの放射性元素は自然に存在し、これらの元素から放射線が出ています。前述したカリウム40は人間の体内に14mg程度(体重60kgの場合)ありますが、これにより私たちは年間157μSv(マイクロシーベルト)の放射線内部被ばくを受け続けていることになります。しかしながら、これらの被ばくによる健康上の問題は報告されていないということも事実です。私たちは世界中でさまざまなレベルで被ばくしていますが、健康を害することなく生活しています。特に、イランのラムサルでは年間平均で最大149mSvという極めて高い放射線量が観測されています。

### 自然放射線の概要

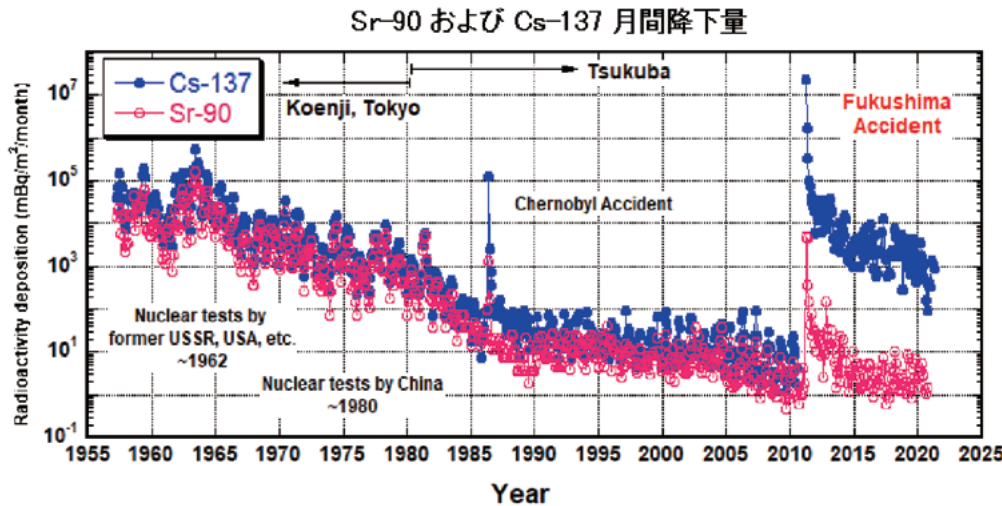
#### << 日常生活と放射線 >>



※出典：資源エネルギー庁「原子力2002」をもとに文部科学省において作成

◇気象庁気象研究所が発表しているデータに、放射性物質であるセシウム137とストロンチウム90の地面への降下量があります。そのデータからソ連やアメリカの大気圏核実験後、チェルノブイリ事故後と福島事故後における放射性物質の蓄積がど

### 大気圏核実験後と福島事故後の放射性物質の蓄積



※出典：気象庁気象研究所「Artificial Radionuclides in the Environment 2021」

100mSv浴びた場合と1日に1mSvを100日あびた場合とはその影響度合いが違うということです。

◇放射線は医療においても活用されています。日本においては年間32万人以上ががんで亡くなり、その医療費は年間3兆円余、罹患者の50%が死亡することで失われている滅失利益は約7兆円とされ、合わせて約10兆円の経済損失があるとされています。そこで重要になってくるのががん治療ですが、放射線療法、特に、重粒子線がん治療法は、手術をしないため体に優しく、早期の社会復帰ができるQOL(生活の質)を重視した現代社会の要望に応えた治療法だと言えます。この重粒子線がん治療は治療期間が短いというメリットに加え、線量の集中性が高く病巣だけを攻撃できるため他の臓器を傷つけません。その

れほどなのか確認できます。チェルノブイリ原発事故と福島第一原発事故後、放射線物質は一時的に増加しているものの、その後すぐに減少しています。各種調査では福島の事故による放射線の影響が顕著に現れているとは言えません。一般的に、低線量の被ばくでは健康への影響は限定的であり、健康への有意な影響は見られないと言えます。つまり、放射線被ばくの影響は、放射線の被ばく総線量や被ばく量率によって異なるということです。例えば、一度に

ため一般的な外科療法や化学療法では難しい膵臓がんや肝臓がん、肺がんなどの治療効果が非常に高くなっています。

## 新 技術を生み出すためにも放射線研究の進展が不可欠

◇放射線応用技術は過去から現在にかけて多くの分野で利用されてきましたが、歴史を振り返ってみると順風で走ってきたものはポリエチレンの加工や自動車タイヤ用のゴムのはしかけなどです。それらがなぜ生き残ったのかというと、プロセスが簡単で他の方法では目指すコストや品質が達成できないからです。中には高密度フロッピーディスクやトンネル内装鋼板など、現在ではほとんど使われなくなった応用技術もあります。このことから生き残っている技術、生き残れる技術としては、社会インフラの底辺を支えるものや他に代わる技術が高コスト、あるいは性能が劣るものを開発ターゲットにする必要があると言えます。

◇日本には巨大な科学技術プロジェクトが数多くあり、徐々に成果を上げています。東海村の大強度陽子加速装置J-PARCプロジェクトではノーベル賞を受賞していますし、RIビームファクトリーでは新しい元素を発見するなど進展を見せています。そうした研究の積み重ねによって数十年後に新たな産業技術が生まれ、新しい放射線応用技術が誕生してくるのではないかと夢は広がります。



## 蓄電池分野で今何が起きているのか？

三田 裕一氏

### 蓄電池の動向について

◇第6次エネルギー基本計画では、2030年度における電源構成比率は再生可能エネルギー（以下、再エネ）が36～38%程度、化石燃料による火力発電は40%程度とされましたが、その実現には、太陽光や風力発電等の再エネの供給力や調整力の確保、系統安定化技術の高度化、既存インフラ等のエネルギーシステムの最大限の活用等が重要なポイントになります。

◇この基本計画決定後、政府では蓄電池技術を活用する機運が高まってきました。この蓄電池技術はエネルギー分野において非常に重要で、再エネの効率的な活用やエネルギー貯蔵への貢献が期待されています。政府は補助金を提供することで蓄電池の導入を奨励、活用を促進しています。この動きは国内だけではなく、中国やアメリカなど他の国々でも蓄電池の新規設置が増加しており、その中でもリチウムイオン電池の普及拡大には目を見張るものがあります。

◇蓄電池はシステム効率が90%程度と高く、他のシステムの効率が70%程度であることと比較すると、「エネルギーの変換と保管に関して非常に効率的である」と言えます。



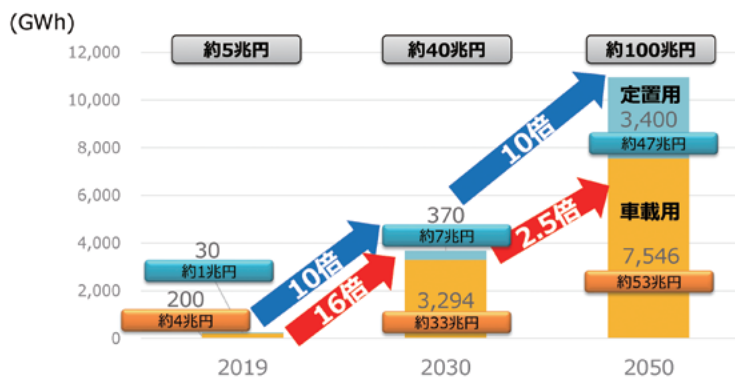
◇蓄電池の役割としては、①太陽光・風力発電の出力変動を吸収、平滑化するシステムの安定化 ②太陽光・風力発電の発電量と需要量とのズレの調整 ③非常に短い時間で起動できることによる火力発電起動までの時間調整力 ④太陽光・風力発電の系統への接続に伴い需要地までの送電線の容量が不足した場合の対策 ⑤需要の少ない時間帯の電力貯蔵 ⑥瞬時電圧低下や停電時のバックアップ電源となります。

### 電力貯蔵技術の役割

蓄電技術の役割	活用内容	事例
① 系統安定化 (周波数、電圧)	太陽光・風力発電での変動を吸収し、短周期と長周期で平滑化する。短周期では大出力(kW)、長周期では大容量(kWh)が要求される	北海道電力NW・南早北、東北電力NW・西仙台、南相馬、離島など
② 需要と供給の時間的シフト	太陽光・風力発電での発電と、需要との時間的なズレを調整するために、数時間の電力貯蔵によりシフトする	九州電力送配電・豊前、沖縄電力・宮古島などの離島、鉄道の電力回収(京浜急行)
③ 調整火力の補助	火力発電の出力制御による系統安定化時に、火力発電の起動時間を補うために電力貯蔵を活用する。火力の出力上昇までの時間を補う。	東北電力NW・西仙台、米国・加州など
④ 送電容量不足対策	太陽光・風力発電は、計画的な導入設置が無い場合、需要地までの送電容量が不足することがある。過疎地に設置される場合には、送電線が無い場合もある。	ドイツの南北連系線、国内の農業用地の転用など。
⑤ 負荷平準化	発電機の利用効率を向上させるために、負荷の少ない時間帯に電力貯蔵する	効率や安全性の観点から定出力運転の電源の活用。需要のピークカット。工場設置のNaS電池など
⑥ バックアップ電源	瞬時電圧低下や停電時の電力供給	精密工場等、落雷対策

※出典：出典：三田氏資料より作成

### 蓄電池の世界市場の推移



※出典：経済産業省 蓄電池産業戦略検討官民協議会 蓄電池産業戦略 (2022年8月)

◇蓄電池市場は急速に成長しており、2050年には市場規模は100兆円に達すると予測されています。2050年以降もカーボンニュートラルの更なる進展に伴い蓄電池の導入がますます拡大すると考えられています。特に電気自動車(以下EV)市場は急成長しています。2022年8月に経済産業省が提案した蓄電池産業戦略では、①リチウムイオン電池の製造基盤を確立 ②材料メーカーを含む生産体制の強化 ③強化した製造能力による国際市場への展開 ④次世代電池の研究促進などの方針が出されています。また国として制御技術の高度化、製品の高品質化や高機能化による競争力強化を目指すこととしています。

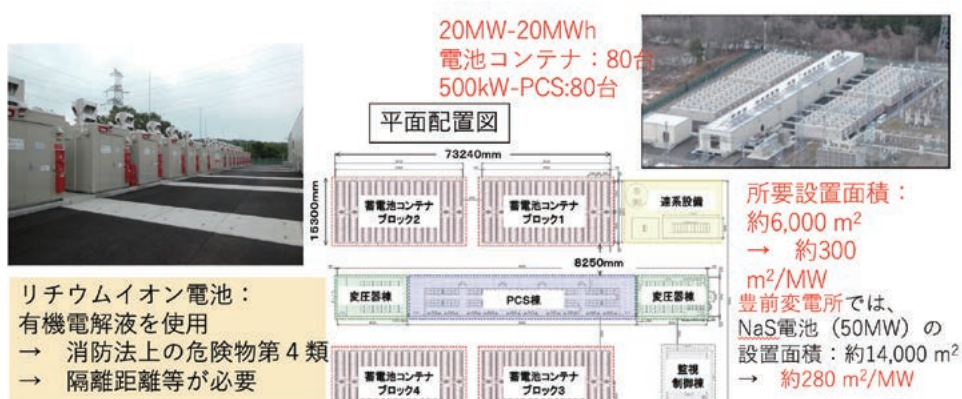
## リチウムイオン電池の現状と課題とは？

◇リチウムイオン電池、特に車載用蓄電池については、日本のメーカーが2015年ごろまで世界を席巻していましたが、その後中国のメーカーが急速に世界シェアを拡大しており、2020年時点でその傾向はさらに顕著になっています。現在では中国のCATLやBYDを含む中国製の電池メーカーが大きなシェアを占め、また、韓国のLG化学やサムスンSDIも市場で競争力を持つ存在となっています。定置用蓄電池についても中国製と韓国製とが競り合いながらシェアを急速に伸ばしています。日本のメーカーでは、パナソニックがベスト10に辛うじて入る程度です。一方で蓄電池にはリチウムやニッケル、コバルトなどのレアアースが必要ですが、日本ではほとんど産出されません。鉱物資源の確保という課題もあります。

◇リチウムイオン電池はリチウム、ニッケル、コバルト、マンガン等の材料で電池の正極と負極を構成しますが、その構成材料によって電圧、容量などの蓄電池特性が異なります。つまり、電池材料の選択は電池の性能や特性に大きな影響を与えるため、EVの開発に合わせて最適な組み合わせを検討する必要があります。今後は高出力、大容量の蓄電池が求められるため開発が加速度的に進むと思われます。また、電池内は電解液で満たされており、この電解液が可燃性の液体であるため、消防法危険物第4類に指定されています。そのため蓄電池運用における安全管理も重要なポイントになります。

◇次に大型蓄電池についてです。例えば、東北電力ネットワーク(株)の西仙台変電所の事例ではリチウムイオン電池が使われ、システム全体の出力は20MWです。500kWのコンテナ80台に分けて配置し、中央には変圧器を配置し、PCS(パワーコンディショナー)はコンテナ1台に対して1台を配置して、全体を統合・制御しています。全体の所要面積は約6,000㎡

### 大型蓄電池の設置事例 (東北電力NW西仙台変電所)



出典: 東北電力「大型蓄電システム緊急実証事業 西仙台変電所周波数変動対策蓄電池システム実証事業」成果報告書

で、20MWを基準にすると、1MW当たりの面積は約300㎡となります。大規模な蓄電池システムになれば設置スペースは重要な課題となります。

◇日本で最大級の蓄電池システムは北海道の北豊富変電所にあり、その出力は240MWで、この場合、その設置面積は約17,000㎡です。将来的な洋上風力発電導入により、大規模な蓄電池が必要となれば、500GWまたは1TWの出力が検討されるでしょう。その場合、広大な敷地が必要になり、場所の確保や費用が重要な課題となります。これらの要因を考慮しながら、持続可能なエネルギー供給の実現に向けた計画を策定しなければなりません。

◇現時点の故障率を勘案すると、単純に電池の数が増えれば、一定数の故障の発生が予想されます。さらに、蓄電池システムがより大容量となると、膨大な数の電池が必要になるため、故障発生防止のための監視と制御、安全に運転するシステムが非常に重要になります。つまりシステムの信頼性を維持するためには高度な管理技術と運用技術が必要になります。

◇蓄電池の寿命も1つの課題として挙げられます。リチウムイオン電池の寿命は年々向上しており、初期の製品では70%まで性能が低下するまでに1,200サイクルから1,700サイクルだったのが、2012年には1万5,000サイクルまで延びています。現在の蓄電池の寿命はさらに向上し、性能の低下がより緩やかになっています。しかし、蓄電池の実際の運用においては、その性能がどれほど維持できるかはまだ検証されていない部分があります。特にリチウムイオン電池の場合、20年以上の使用実績は存在しません。そのため、長期間の安全性や性能維持の検証が必要です。

◇特に、蓄電池の運用中に劣化状態を適切に評価する残存価値の見える化が重要な課題のひとつです。一般的に、蓄電池の劣化は温度や充電率などの運用条件に依存します。温度が高い場合や充電率が高い場合には劣化が進みやすいとされていますが、劣化の具体的なパターンは電極材料によって異なります。したがって、運用条件ごとの蓄電池の適切な評価と管理には、材料ごとに適した基準を設定し、材料別に劣化の挙動を理解することが大切です。

◇また、蓄電池の安全性に関しては、規制や基準が国内外で整備、改善されています。中国製や韓国製の蓄電池が日本に導入されていますが、日本の規定、法令等を遵守して運用することで、現時点で国内での大規模な蓄電池の事故事例はありません。今後も、大規模な蓄電池の設置においては、日本国内の法令や規定に基づいて、消防との協議や保安上の規定に従い、安全性を確保しなければなりません。

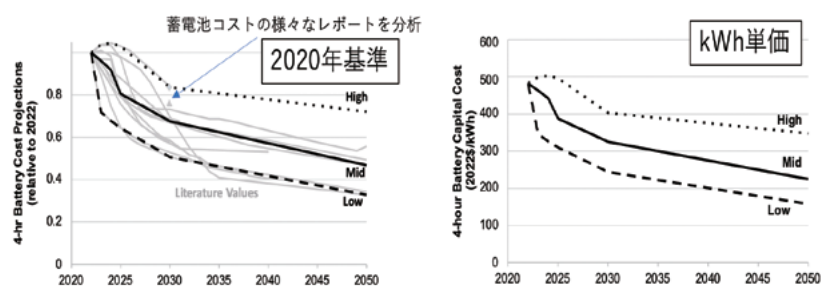
## さまざまな要因で変動する蓄電池コスト

◇蓄電池のコストについて、日本では比較的高い傾向が見られますが、海外の事例を見ると低コストのケースもあります。例えば、オーストラリアでは2017年に100MWの蓄電所が建設され、そのコストは5.8万円/kWhでした。このシステムはテスラ製の電池を使用し、短期間で導入されました。一般市場価格としての参考値となるか否かについては疑義が残りますが、導入事例としては参考になります。

◇日本の場合、蓄電池の価格は2019年時点で24万円/kWh程度でした。政府の蓄電池産業戦略では目標として2030年までに約6万円/kWhに削減することが挙げられており、将来的には価格がさらに低下すれば、蓄電池の導入が促進される見込みです。

◇蓄電池システムのコストに関する情報に詳しいアメリカのNREL(National Renewable Energy Laboratory)のレポートを参考に蓄電システムの導入コストを比較してみます。4時間容量のリチウムイオン蓄電池の系統用蓄電池導入コストの見通しを見ると、2030年時点で245~403USD(USDドル)/kWhが、2050年で159~348USD/kWhと予測され、蓄電池システム導入コストが安くなる可能性を示しています。また、寿命を15年、充放電Wh効率を85%と想定し、2時間、4時間、6時間容量の複数容量の蓄電池システムの将来コストの見通しでも同様に安くなる可能性が示されています。

### 蓄電池システムの将来コスト見通し



※出典：Cole, Wesley and Akash Karmakar. 2023. Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2023 Update. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A40-85332.

◇当然、蓄電池の材料コストの高騰などにより、蓄電池のシステムコストは変動する可能性があります。COVID-19パンデミックやウクライナ危機の影響など世界情勢の不安定化が原材料コストに影響を与え、2022年と2023年は価格が上昇しています。しかしながら、全体的には下降傾向にあり、この傾向に沿って変動していくのではないかと考えられます。

## 劣化診断や残存価値の評価技術確立を

◇世界的にカーボンニュートラルの目標達成に向けて再エネの導入が進むと思われます。そのためには、電力貯蔵技術の導入は不可欠であり、中でも蓄電池技術はコストの低減と技術開発の進展に伴い、より普及していくと思います。加えて、海外製の蓄電池システムの導入も拡大するでしょう。その中で、劣化診断や残存価値評価技術が確立されていないことは大きな課題であり、これらをしっかりと確立し、最大限の電池パフォーマンスを実現することが必要だと思います。そのためにはより多くの導入事例データの評価、分析に取り組むことが重要です。事業者の皆さまは、今後、いろんなところで蓄電池を導入、使用されると思いますが、その蓄電池使用データは非常に重要なので、しっかりとモニタリングをされ、そのデータを元に我々とともに問題解決に取り組んでいただきたいと思います。



▶ これまでに開催したエネルギー講演会の講演録を九州エネルギー問題懇話会ホームページに掲載しています。ぜひご覧ください。

九エネ懇

検索