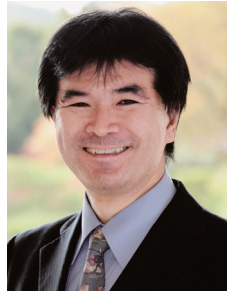


## 企画調査グループ



グループリーダー  
都筑 秀明

### 【コアメンバー】

サブリーダー・専門役	高木 正人
サブリーダー	中村 哲
主席研究員	野村 眞
研究管理チームリーダー	作山 邦夫
国際標準化チームリーダー	青木 好範
調査役	中神 保秀
主幹	斎藤 一郎
主幹	葛原 宏治
主幹	東 宏幸
主幹	清水 淳一
主幹	倉中 聡

## CCS導入に向けた今後の対応について

### 1. はじめに

昨年（2015年）12月のCOP21において、パリ協定が合意された。この協定において、「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力を追求すること」、「今世紀後半に人為的な温室効果ガスの排出と吸収源による除去の均衡を達成するために、最新の科学に従って早期の削減を行うこと」などが盛り込まれた。また、「各締約国は、「貢献」（削減目標・行動）を作成、提出、維持する」とともに「目的を達成するための国内措置をとる」こと、「貢献」を5年ごとに提出する」ことが決められた。これにより、発展途上国も含めて全世界が温室効果ガスの削減に取り組むとともに、5年ごとにレビューが行われる方向となった。

このような中、温室効果ガスである二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を削減する重要な対策の一つとして、二酸化炭素回収、貯蔵（CCS）が大きく期待されている。一方、CCSには、様々な懸念があり、本格的な導入に向けた様々な課題もある。

本稿では、CCSを巡る内外の動向を概観するとともに、CCSの本格導入に向けて取り組むべき方向等について述べる。

### 2. IPCCのAR5が示唆するもの

2014年に取りまとめられた気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次報告書（AR5）統合報告書の政策決定者向け要約によれば、「2100年までの範囲では二酸化炭素累積排出量と予測される世界平均気温の変化量の間、強固で、整合的で、ほぼ比例の関係があることを示している。」と記載されている。したがって、安定化させる温度が何度であれ、世界の平均気温を一定にさせるためには、CO<sub>2</sub>の「累積」排出量を一定にすること、つまり、増分の排出量である年間の排出量をゼロにすることが必要である（図1参照）。また、2100年にCO<sub>2</sub>濃度

を430~480ppmにするシナリオ（いわゆる2℃シナリオ）では、2100年に年間排出量がほぼゼロ、電力部門では2050年に年間排出量がほぼゼロとなっている（図2、図3参照）。政策決定者、CO<sub>2</sub>排出事業者などの関係者は、これらの点を十分に認識して対応することが必要である。

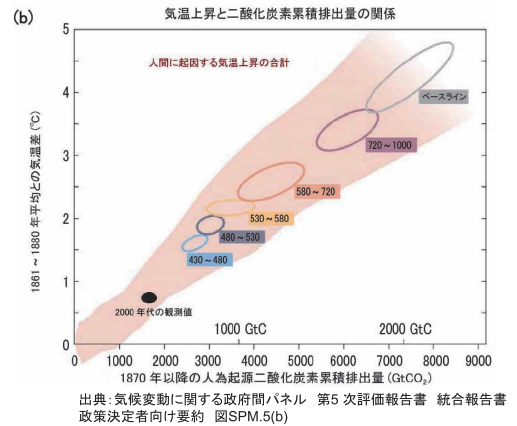


図1 CO<sub>2</sub>の累積排出量と世界平均地上気温との関係

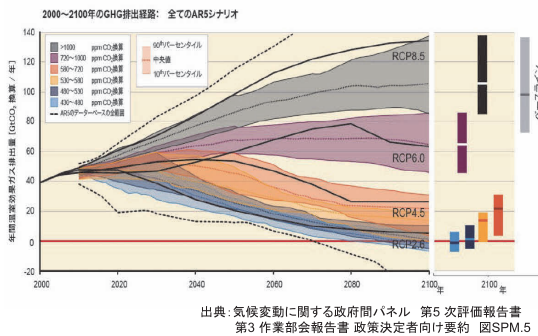


図2 2000年から2100年までの各代表的CO<sub>2</sub>排出経路

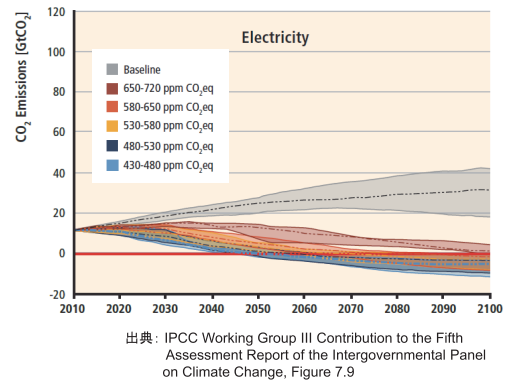


図3 電力部門における2100年までの各代表的CO<sub>2</sub>排出経路

一方、CO<sub>2</sub>排出削減のためのインフラ整備には相当の時間を要する。例えば、火力発電所の建設リードタイムは平均で10年程度と言われている。すべて同時に建設することは出来ないで順次整備することとなり、最終的な整備に要する時間は建設リードタイムの数倍以上の時間となる。したがって、これらの点を考慮すれば、2100年、2050年と言えども時間的に十分な余裕があるとは言えない。早期からの対策を進めることが必要である。

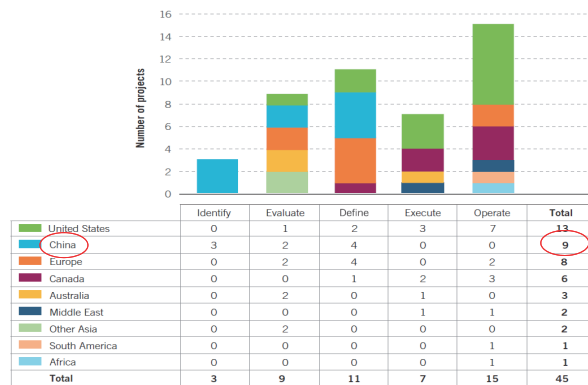
CO<sub>2</sub>削減対策の選択肢は限られている。可能性のある全ての対策を検討し、着実に実施することが必要である。その中で、CCSは、重要な対策オプションの一つとして、導入の促進が重要である。しかし、CCSの本格導入のためには、相当の時間と資金が必要である。例えば、「未調査地域を最終投資判断に対応できる水準まで完全に評価するには、10年以上が必要」と指摘されている。このため、将来後手の対応にならないよう、着実に準備を進めていくことが極めて重要と考える。

### 3. CCSを巡る海外の動向

#### 3.1 世界におけるCCS大規模プロジェクトの現状

GCCSIの「世界のCCSの動向2015」によれば、世界の大規模プロジェクトの開発状況は、運転中のものが15件、建設中のものが7件、全体で45件となっている。昨年に比べ、運転中のものが2件増え、建設中のものが2件減っている。全体のプロジェクトは10件減って、45件となっている（図4参照）。

中国は、プロジェクト数が9件と米国に次いで多い数字となっている。未だ建設、運転段階のものはないが、今後EORを中心にプロジェクトの進展が期待されている。



出典: The global Status of CCS 2015 VOLUME 2

図4 世界におけるCCS大規模プロジェクトの現状

#### 3.2 CO<sub>2</sub>排出に関する米国の規制動向

昨年（2015年）8月に、米国環境省（EPA）が、大気浄化法（Clean Air Act）に基づき、二つの規制を発表した（表1参照）。

一つは、新設・改修・改造火力発電所に対するCO<sub>2</sub>排出規制である。本規制は、昨年10月23日に既に施行済みである。規制の対象は、新設工事が2014年1月9日以降に開始された火力発電所である。新規に石炭火力を建設する際には、CO<sub>2</sub>の排出量をMWh当たり640kg以下に、新規にガス火力を建設する際、売電分についての設備利用率の値が設計発電効率の値よりも大きい場合には、CO<sub>2</sub>の排出量をMWh当たり、発電端ベースで450kg又は送電端ベースで470kg以下に抑制することとなっている。今後、新規に火力発電所を設置する際には、石炭火力については、CCS設備を設置せざるを得なくなる。

二つ目は、州毎のCO<sub>2</sub>排出規制で、既存の火力発電所に対する規制である。本規制は、昨年12月22日に施行済みである。EPAが①全州共通の個々の既設火力発電所に対するCO<sub>2</sub>排出性能レート、②州ごとのCO<sub>2</sub>排出レートによる目標値、③州ごとのCO<sub>2</sub>排出総量による目標値を設定し、各州は、これらのCO<sub>2</sub>排出目標を達成するために、州の計画を策定し、実行する。具体的な達成方法については、州の計画の中で決めることが求められている。対策例としては、熱効率の改善、燃料の転換、再生可能エネルギーの併用、CCS・CCUの導入、バイオマス混焼、排出質量

表1 CO<sub>2</sub>排出に関する米国の規制動向

国名	CO <sub>2</sub> に関する主な規制等の概要
米国	<p>【個別発電所へのCO<sub>2</sub>排出規制】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○EPAによる新排出性能基準（NSPS）規制案（2015年10月23日施行） <ul style="list-style-type: none"> <li>・Clean Air Act 111条b項に基づき、EPAが制定。</li> <li>・新規石炭火力：640 kg-CO<sub>2</sub>/MWh（GROSS；発電端）（Partial CCSの実施）</li> <li>・新規ガス火力（ベースロード電源）： <ul style="list-style-type: none"> <li>450kg-CO<sub>2</sub>/MWh（GROSS；発電端）又は470kg-CO<sub>2</sub>/MWh（NET；送電端）</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>○各州によるEPS規制（カリフォルニア州、ワシントン州、オレゴン州） <ul style="list-style-type: none"> <li>・ベースロード電源：500kg/MWh</li> </ul> </li> </ul> <p>【州毎のCO<sub>2</sub>全体排出規制】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○既設火力発電所に対する排出規制（2015年12月22日施行） <ul style="list-style-type: none"> <li>・Clean Air Act 111条d項に基づく既設火力発電所に対する排出規制 <ul style="list-style-type: none"> <li>①全州共通の個々の既設火力発電所に対するCO<sub>2</sub>排出性能レート、②州ごとのCO<sub>2</sub>排出レートによる目標値、③州ごとのCO<sub>2</sub>排出質量による目標値が設定。</li> </ul> </li> <li>・各州はEPAによって設定されたCO<sub>2</sub>排出性能目標を達成するための州の計画（State Plan）を策定して実行。</li> </ul> </li> <li>・対策例としては、熱効率の改善、燃料の転換、再生可能エネルギーの併用、CCS・CCUの導入、バイオマス混焼、排出質量取引きの利用など。</li> <li>・2030年までに発電部門で2005年比で32%のCO<sub>2</sub>削減を図る。</li> </ul>

取引の利用などが挙げられている。

米国では、個別規制、州毎の全体規制により、CO<sub>2</sub>削減を図る戦略である。これにより、2030年までに発電部門で2005年比32%のCO<sub>2</sub>削減を図ることとしている。

### 3.3 CCSのISO化

国際標準化機構 (ISO) では、専門委員会 (TC265) を設立し、CCSの規格原案の作成作業が行われている。TCの下に、「回収」、「輸送」、「貯留」、「定量化と検証」、「横断的課題」、「EOR」に関する6つのワーキンググループ (WG) が設置されている。これに対する我が国の体制としては、RITEが国内審議団体として指名され、ISO/TC265国内審議委員会と関連各WGを設置している。

各WGにおいては、国際規格 (IS) と技術報告書 (TR) の策定作業を行っている (表2、図5参照)。WG1では、回収技術の技術報告書が最終合意され、出版準備中である。本WGは、日本が主導で議論を進めてきているが、発行されれば、TC265として初の出版物となる。また、発電分野における燃焼後回収技術に関する国際規格の開発にも着手している。WG2では、パイプライン輸送に関する国際規格を開発中であり、今年中に発行される。WG3では、陸域、海域の貯留を対象にした国際規格を開発中である。WG4では、定量化と検証分野の情報を集めた技術報告書を開発中である。WG5では、CCSのボキャブラリに関する国際規格とリスクマネジメントに関する技術報告書を開発中である。WG6では、CCS-EORに関する国際規格を開発中である。

2016年には最初の技術報告書および国際規格が発行される予定である。

表2 CCSのISO化 (各WGの状況)

WG	標準化の内容	出版目標	備考
WG1 (回収)	● 回収技術を集めたTRは最終合意されISOにて出版準備中。ISO/TR 27912 ● IS (発電分野・燃焼後回収技術)のNWIPが承認され開発着手。ISO 27919-1	TR:2015 IS:2018	ISO/TR 27912は2015年中に出版予定。日本主導でTC265として初の出版
WG2 (輸送)	● パイプライン輸送に関するISを開発中で、DIS投票し承認。投票コメント対応中。ISO 27913	IS:2016	216個のコメントに基づきドラフトを改訂中。船舶輸送は今後の検討課題。
WG3 (貯留)	● 陸域、海域の貯留を対象にIS開発中でCD投票し承認。投票コメント対応中。ISO 27914	IS:2017	1000個のコメントに基づき改訂予定。2016年9月DIS投票目標。
WG4 (Q & V)	● 定量化と検証分野の情報を集めたTRを開発中 ISO/TR 27915	TR:2016	WD作成中。2016年1月DTR投票予定。
WG5 (クロスキャッチング)	● CCSのボキャブラリに関するISを開発中。クロスキャッチング用語について2回目のCD投票予定。ISO 27917 ● Lifecycle risk managementに関するTR開発中。ISO/TR27918 ● Stakeholders engagementをPWIキャンセル	IS:2017 TR:2017	ISO 27917は開発期間4年へ変更。
WG6 (CO <sub>2</sub> -EOR)	● TPを立ち上げ、WD開発中。ISO 27916	IS:2018	ドラフトの作成中。2016年春にはCD投票予定。

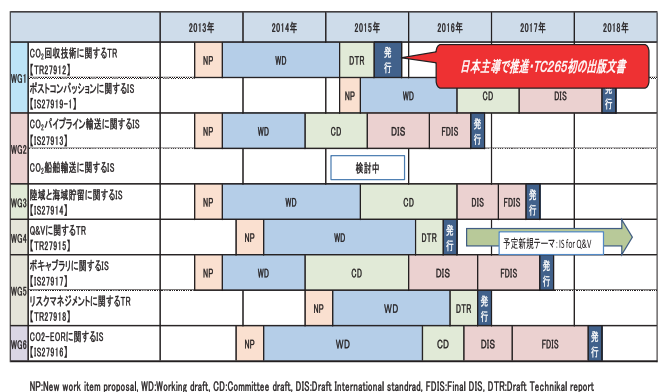


図5 標準化のスケジュール

## 4. CCS導入のために着実に進めるべき対応の方向

### 4.1 CCSの重要性和課題

地球の地表平均気温の上昇を抑制するべくCO<sub>2</sub>排出の大幅削減を図るためには、対策の選択肢が限られている中、省エネルギー、再生可能エネルギー、原子力などの低炭素エネルギー技術とともに、CCSの導入を推進することが極めて重要である。電力部門においては、太陽、風力等の再生可能エネルギー、原子力

発電だけでは、負荷変動に十分追従できないため、負荷調整機構（蓄電池又は調整電源）が不可欠である。この観点からもCCSを有する火力発電は極めて重要な対策手段と言える。

一方、我が国においては、CCSに対して、いくつかの指摘・懸念がある。①外部不経済である地球温暖化問題への対応に特化したCCSの導入はコストアップとなるだけであり経済的メリットが無い、②断層等が多く不均一な地層で、地震も発生する我が国に大量のCO<sub>2</sub>を貯留する場所があるのか、③導入のための制度等が現時点で未整備で、予測よりも貯留量を確保できないリスクもあるなど、CO<sub>2</sub>貯留はリスクが高く事業として実施できるのか、といったものである。

#### 4.2 CCSの導入のための今後取り組むべきこと

以上の懸念、課題を踏まえると、CCSを今後本格的に導入していくためには、CCS導入の容易化、事業実施の不確実性の低減等が必要である。具体的には以下の通りである。

一つ目は、CCSのコスト削減のための技術開発の継続的な実施である。CCS導入を容易にするためには、コスト削減が極めて重要である。2030年頃の本格導入が見込まれる中、民間だけで技術開発を進めることは極めて困難である。国が主導して、技術開発の継続的な実施を進めることが必要である。

二つ目は、CO<sub>2</sub>貯留賦存量の把握とデータベース化である。政策決定者、CO<sub>2</sub>排出事業者などの関係者がCCSを本格的に導入する決断をする上で、我が国のCO<sub>2</sub>貯留賦存量を把握することが極めて重要である。一方、「未調査地域を最終投資判断に対応できる水準まで完全に評価するには、10年以上が必要」と指摘されている。CO<sub>2</sub>賦存量の把握とデータベース化は期間と資金が必要であるため、早期の調査開始が望まれる。

三つ目は、日本の地層を想定した経済的で安全なCCS技術の開発である。日本の地層には多くの断層が存在し、特性分布も不均一である。このような地層に十分な貯留量を確保するには、日本の地層を想定した経済的で安全なCCS技術の開発が必要である。RITEでは、帯水層内の地層水等を排出する次世代CO<sub>2</sub>貯留・利用システム（SUCCESS）を提案している。

四つ目は、CCS導入のための仕組み、法制度等の整備である。外部不経済である地球温暖化問題への対応に特化したCCSは、市場原理だけでは導入が困難である。補助金、税制等のインセンティブ、排出権取引、規制等の仕組みを構築することが必要である。

最後は、CCSの理解増進である。CCSは、地球温暖化対策の重要な技術であるにもかかわらず、あまり知られていないのが現状である。その一方で、CO<sub>2</sub>の漏洩等の懸念もある。CCSの理解増進に向けては、正確な知識を分かり易く説明する努力が重要である。

#### 4.3 CCS導入のイメージ

回収技術、貯留技術に関する研究開発を継続的に実施するとともに、CO<sub>2</sub>貯留賦存量の調査、評価を行うことも重要である。本格導入の前に、大規模実証の実施も必要である。CO<sub>2</sub>は漏洩しないのか、誘発地震を引き起こさないのか等に懸

念があるので、国民の理解増進は継続的に実施する必要がある。実際の事業実施に当たっては、地点の詳細調査、環境アセス、建設などの期間が必要である。「未調査地域を最終投資判断に対応できる水準まで完全に評価するには、相当の時間（10年以上）が必要」と指摘されているので、この点を考慮すれば、2030年から本格導入していくためには、運転開始の7年～10年前から準備することが必要である。その前提条件として、法制度の整備、導入のための仕組みなどを整備しておく必要がある。以上を踏まえたCCS導入のイメージを図6に示す。

以上の通り、CCS導入に向け、計画的に、着実に準備することが必要である。

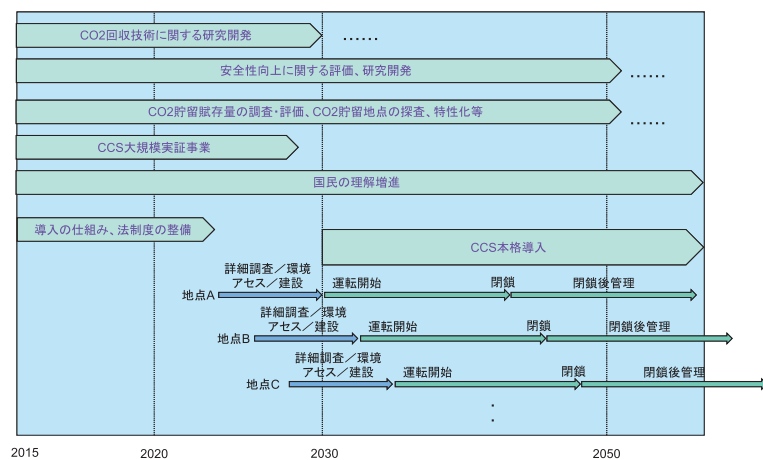


図6 CCSの導入のイメージ

## 5. より経済的で安全なCCS技術 (SUCCESS) の検討

### 5.1 複数坑井システムによる貯留量の確保

我が国の地層は、断層や不透水層が多数存在しており、実際に貯留しようとしても十分な量の圧入が出来ない可能性がある。CO<sub>2</sub>貯留に際しては、このような点を考慮する必要がある。次世代CO<sub>2</sub>貯留・利用システム (SUCCESS) は、圧力井と緩和井を設けて、地層圧上昇の抑制、圧入レートの向上を図るとともに、熱エネルギーを回収する次世代のCO<sub>2</sub>貯留システムとして提案したものである

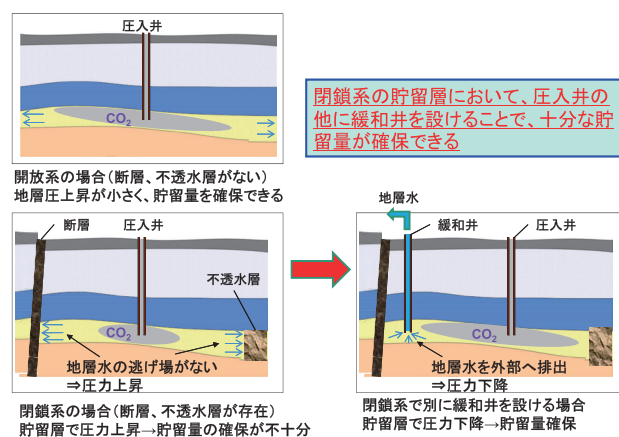


図7 複数坑井システムによる貯留量確保のイメージ

が、断層や不透水層を境界とする閉鎖系の貯留層においても十分な貯留量の確保を可能とすることが期待されている。断層、不透水層がない開放系の貯留層の場合には、通常の圧入で貯留量を確保できるが、閉鎖系の貯留層の場合には、一定以上のCO<sub>2</sub>を圧入すると地層水の逃げ場がないため、圧力上昇が起こり、CO<sub>2</sub>の圧入が出来なくなり、十分な貯留量を確保できない。これに対して、別の場所に緩和井を設けて地層水を外部に排出することにより、圧力を下げ、本来貯留層が有するCO<sub>2</sub>の貯留量を確保することが出来る。つまり、閉鎖系の貯留層において、圧入井の他に緩和井を設けることで、十分な貯留量を確保することができる(図7参照)。

### 5.2 数値シミュレーションによる複数坑井システムの有効性検討

RITEでは、ある地点の地層データを基に、圧入井と緩和井を設けた場合の数値シミュレーションを行った。その結果を図8に示す。図8のうち、W-1が圧入井、W-2、W-3が緩和井である。W-1,2,3ともに高浸透率ゾーンに配置した。圧入量は、年間100万tとした。計算は、緩和井非設置、W-2に緩和井設置およびW-3に緩和井設置、の3ケース行なった。結果は、緩和井を設置しない場合は4年で地層圧が上昇して圧入できなくなった。W-2に緩和井を設置した場合は、12年以上圧入することが出来た。つまり、緩和井によって貯留可能量は3倍以上に増加した。一方、W-3に緩和井を設置した場合、4年で圧入が出来なくなり、効果は認められなかった。これは圧入井W-1と緩和井W-3の間に3次元的高浸透率部の連続性(導通性)がなかったためである。以上のように、緩和井の設置は閉鎖系では極めて有効だが、設置場所と地層の条件によっては改善効果がないこともあるため、坑井の配置が重要な課題となる。

上述の通り、緩和井の設置場所によって、貯留可能量は大きく異なる。このため、どの位置に圧入井と緩和井を配置すると累積のCO<sub>2</sub>貯留量が最大になるかを明確にすることが重要である。2015年度は、最適な坑井配置を確定する手法として、差分進化法(Differential Evolution, DE)を用いて3450ケース計算した。最大化した累積CO<sub>2</sub>貯留量(25年間)は約1560万トンとなり、最低値と比べて3.3倍に増加する結果が得られた(図9参照)。複雑な地層にCO<sub>2</sub>を効果的に圧入するには、このような手法の更なる開発が極めて重要である。

緩和井の設置は閉鎖系では極めて有効。緩和井がある場合、貯留可能量は3倍以上に増加。ただし、坑井間に導通性が無い場合は改善なし。

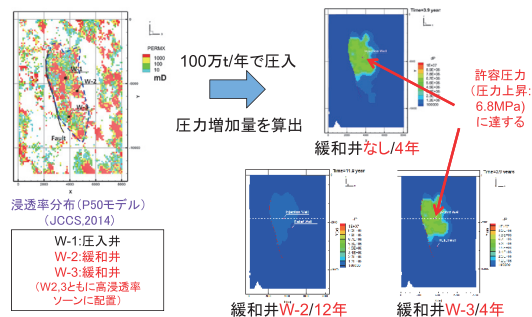


図8 数値シミュレーションによる有効性検討

差分進化法(Differential Evolution, DE)を用いて3450ケース計算し、最大値が得られたのは2982回目のケース  
最大化した累積CO<sub>2</sub>貯留量(25年間)は8,329MMm3(約1560万トン)  
最低値と比べて3.3倍に増加。

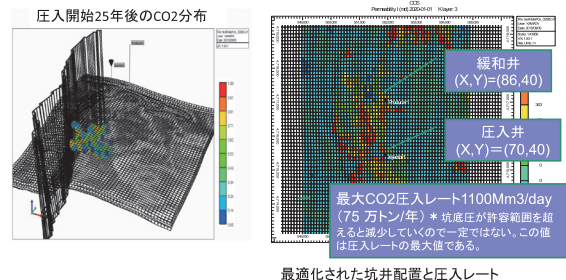


図9 最適化された坑井配置と計算結果

一方、緩和井を設置する方法は新たな坑井掘削や水の処理などコストの増加を招く。今後は、コスト増と貯留量増大効果とのトレードオフの関係も考慮した検討および計算をやっていくことも必要である。

## 6. まとめ

世界の平均地上気温を安定化させるためには、究極的にはCO<sub>2</sub>の年間排出量をゼロにすることが必要である。いわゆる2℃シナリオでは、①2100年にCO<sub>2</sub>の年間排出量がほぼゼロ、②電力部門では、2050年にCO<sub>2</sub>の年間排出量がほぼゼロ、それ以降は負の排出となっている。選択肢が限られている中、CCSは、重要な対策オプションの一つとして、導入の促進が必要である。

CCSを今後本格的に導入していくためには、①CCSのコスト削減のための技術開発の継続的な実施、②CO<sub>2</sub>貯留賦存量の把握とデータベース化、③日本の地層を想定した経済的で安全なCCS技術の開発、④CCS導入のための仕組みづくり、⑤CCSの理解増進などが不可欠である。特に、多くの断層が存在し、特性分布も不均一である日本の地層において、十分な貯留量を確保するには、日本の地層を想定した経済的で安全なCCS技術の開発が必要である。RITEが提案している次世代CO<sub>2</sub>貯留・利用システム（SUCCESS）は、緩和井の設置により、閉鎖系の地層では極めて有効である。今後最適な配置の決定手法の開発が重要である。