



日本機械学会 2022年度年次大会 ワークショップ  
持続可能な未来の実現のための技術ロードマップ

2022年9月12日

**計算力学分野における  
環境 & エネルギー関連の取り組み紹介**

**吉村 忍**

東京大学副学長、工学系研究科教授



**東京大学**  
THE UNIVERSITY OF TOKYO

# カーボンニュートラルへの取組みが一気に加速！

2019.12

## 欧州 グリーンディール

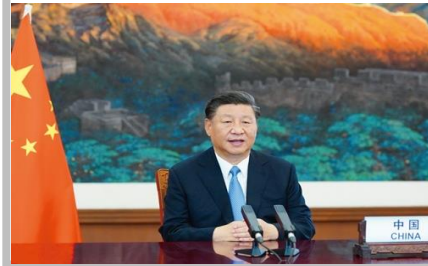
- ・2050年温室効果ガス排出ゼロ
- ・2030年削減目標引上げ検討



2020.9

## 中国 国連総会表明

- ・2060年温室効果ガス排出ゼロ
- ・2030年までにCO2減少に転換



2020.11

## 米国 Clean Energy Revolution(選挙公約)

- ・2050年までに100%グリーンエネルギー・排出量実質ゼロ



2020.12

## 日本 グリーン成長戦略

- ・2050年温室効果ガス排出ゼロ
- ・成長14分野へ集中投資



## COVID-19パンデミック化と社会のCPS\*への加速

仮想空間



現実空間

2021.4

- ### 日本
- ・2030年温室効果ガス排出 -46%

2021.8

### 国連気候変動に関する政府間パネル (IPCC)第6次評価報告書

2021.11

### COP26 「グラスゴー気候合意」

世界の平均気温の上昇を工業化前の水準からプラス2℃をはるかに下回る水準にし、1.5℃に抑える努力を追求する。

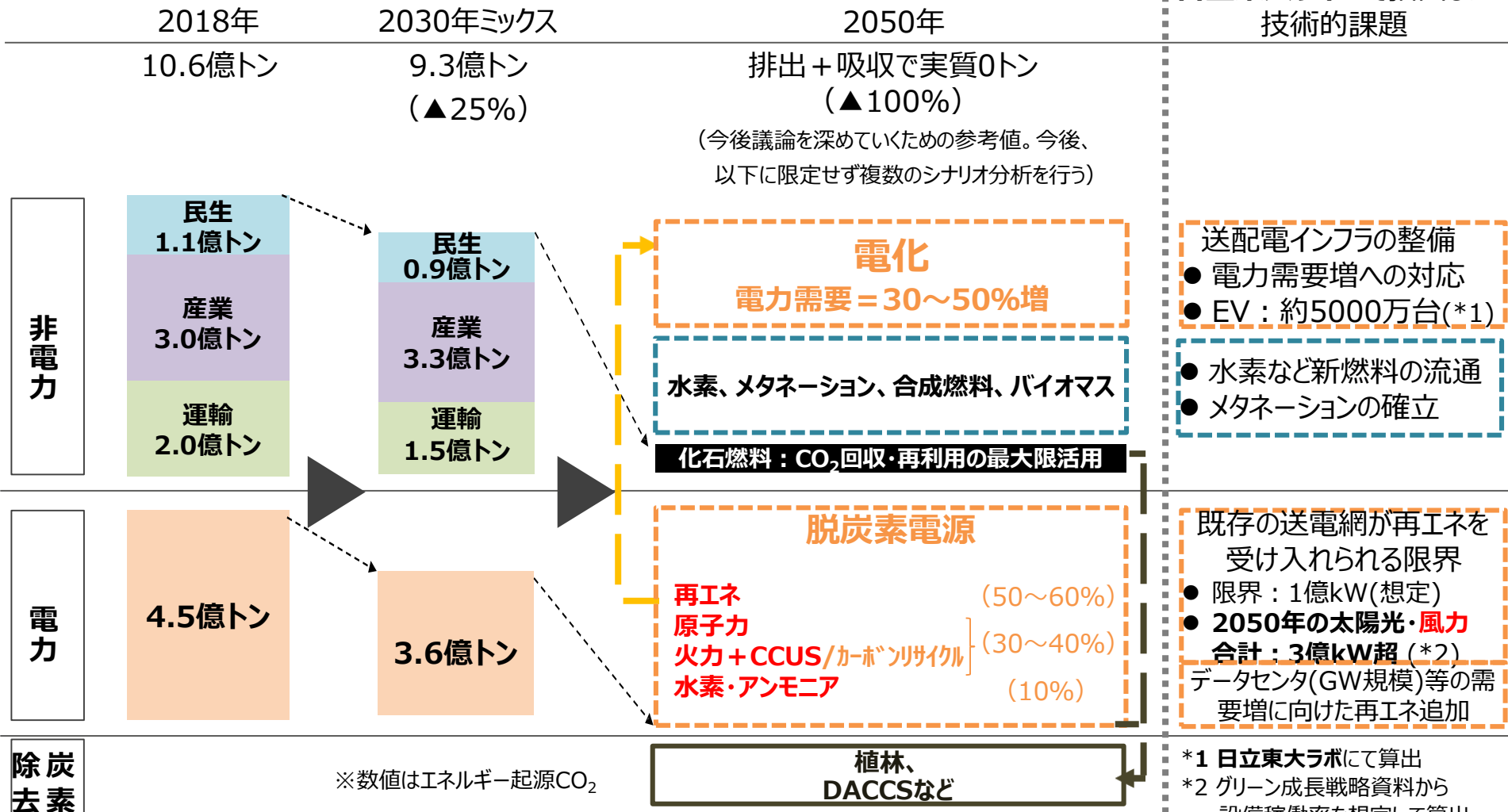
\*CPS: Cyber-Physical System

# 2050年カーボンニュートラルへのグリーン成長戦略

(2020年12月 経済産業省より提示)

電化や水素・新燃料による化石燃料の代替を実現する社会全体のトランジションが必須  
これらを支える再エネ大量導入・CO<sub>2</sub>回収・新燃料技術、構造改革の移行プロセスが課題

【2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略】

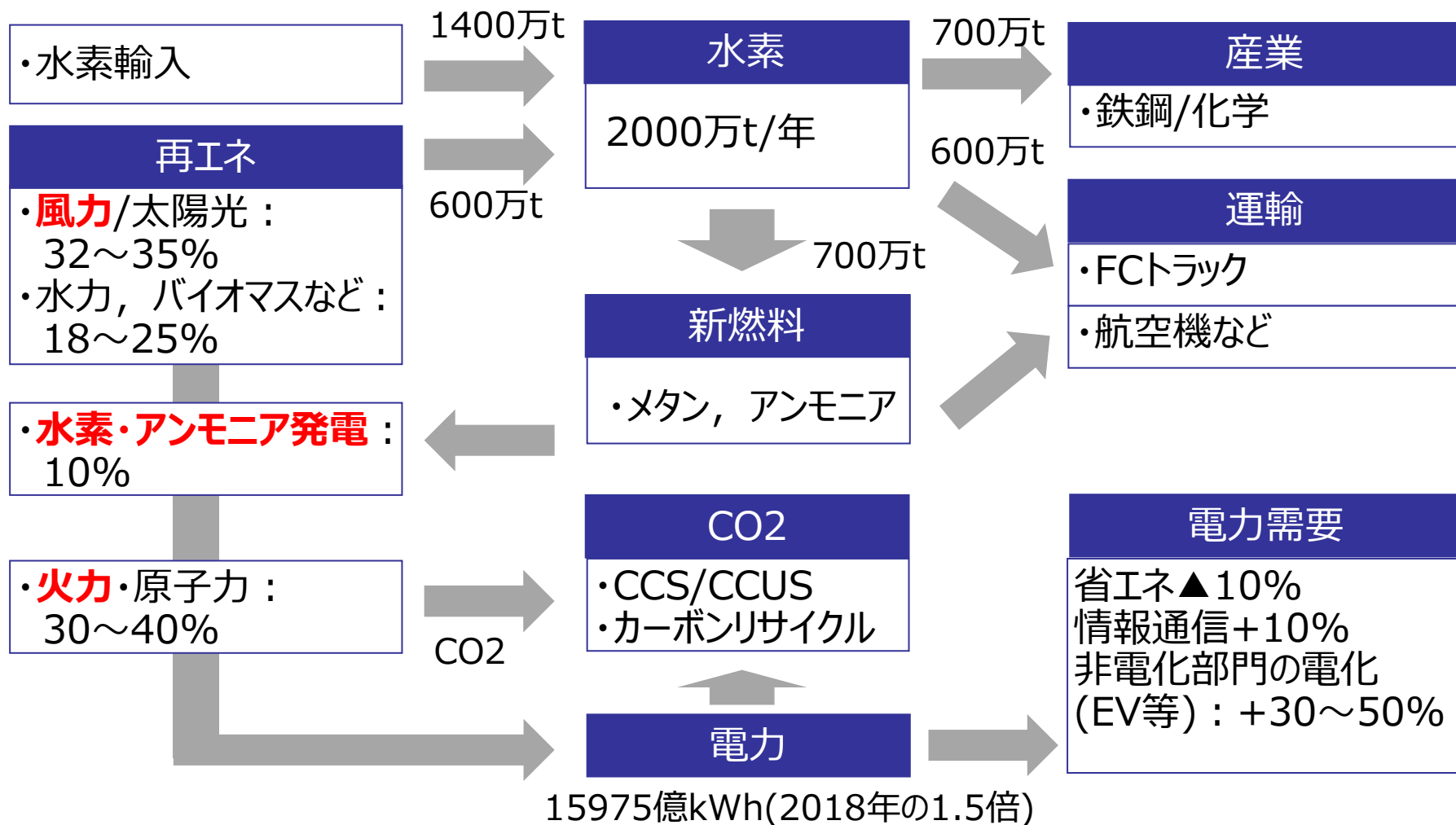


\*1 日立東大ラボにて算出  
\*2 グリーン成長戦略資料から設備稼働率を想定して算出

# 2050年カーボンニュートラルの

## エネルギー構成・バリューチェーン

再生電力による製造で不足する水素を輸入，新燃料とCCUSで既存発電を活用



※グリーン成長戦略資料を参考に日立東大ラボで試算

※CCUS: Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage, FC: Fuel Cell

# 21世紀を生きる我々が持つべき時代認識

(地球温暖化対応)

**Society5.0** × **カーボンニュートラル** × **レジリエンス**  
(データ利活用、人中心、…) **社会の実現** (防災・減災・復旧、頑健、…)

**その実現のための技術基盤:**

**CPS : Cyber-Physical System, Human-centric**

**デジタルツイン Digital Twin**

(シミュレーション + センサ・アクチュエータ + データサイエンス)

個別テクノロジーの研究開発に加えて

カーボンニュートラルに向けた総合的・俯瞰的議論の重要性

## ■ 日本学術会議における議論

### カーボンニュートラル連絡会議

[https://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/carbon\\_n/index.html](https://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/carbon_n/index.html)

## ■ 日立東大ラボにおける議論（提言）

2050年カーボンニュートラルを達成し、

Society5.0を支えるエネルギーシステムとは

<http://www.ht-lab.ducr.u-tokyo.ac.jp/2022/03/24/news038/>



# 第25期日本学術会議におけるカーボンニュートラル(C.N.)活動の俯瞰図 ～ カテゴリーA～Hと主要キーワード ～

## A. 地球・気候変動・気象・災害関係

(大気・海・陸、計測・観測、シミュレーション)

- 1.気候システムの解明・観測・予測・気候変動の影響、2.成層圏・対流圏、3.濃度計測、4.観測プラットフォーム、5.シミュレーション・予測、6.海洋酸性化・ブルーカーボン、7.地球温暖化、8.激甚災害、9.土地利用・土地利用変化・林業、10.食料安全保障、11.地球環境観、12.プラネタリ・バウンダリ

## F. C.N.とのトレードオフと相乗効果

- 1.生物多様性保全、2.資源・材料の循環利用、3.安全・安心・レジリエンス、4.社会的受容、5.健康・公衆衛生、6.大気汚染

## E. 包括的アプローチ、ビジョン、社会変革、制度設計・政策、企業活動、人間行動

- 1.フューチャー・アース、2.環境学・環境教育、3.技術的開発戦略、4.社会・経済ビジョン、5.世界と日本の施策、6.サーキュラーエコノミー、7.グリーンフレーション、8.制度設計・法・政策、9.企業行動・組織経営、10.企業倫理・社会責任投資、11.経済的手法(税・排出権取引)、12.循環デザイン、13.土地・国土、14.国際ガバナンス、15.人間行動・行動変容、16.生活デザイン、17.社会変革・合意形成

## B. C.N.エネルギー

(一次エネルギー、二次エネルギー)

- 1.エネルギーのポートフォリオ、2.電気・電力、3.風力・太陽光、4.原子力、5.バイオマス、6.水素、7.アンモニア・メタネーション、8.未利用熱エネルギー

## C. 特定分野のC.N.化の取組み

- 1.食料・食料生産流通・フードシステム・食品ロス、2.医療・歯科、3.材料・素材、4.住宅・建築・都市、5.自動車・鉄道、6.海洋・船舶・航空・宇宙、7.情報・通信・コンピュータ、8.生産・ものづくり、9.カーボンフットプリント

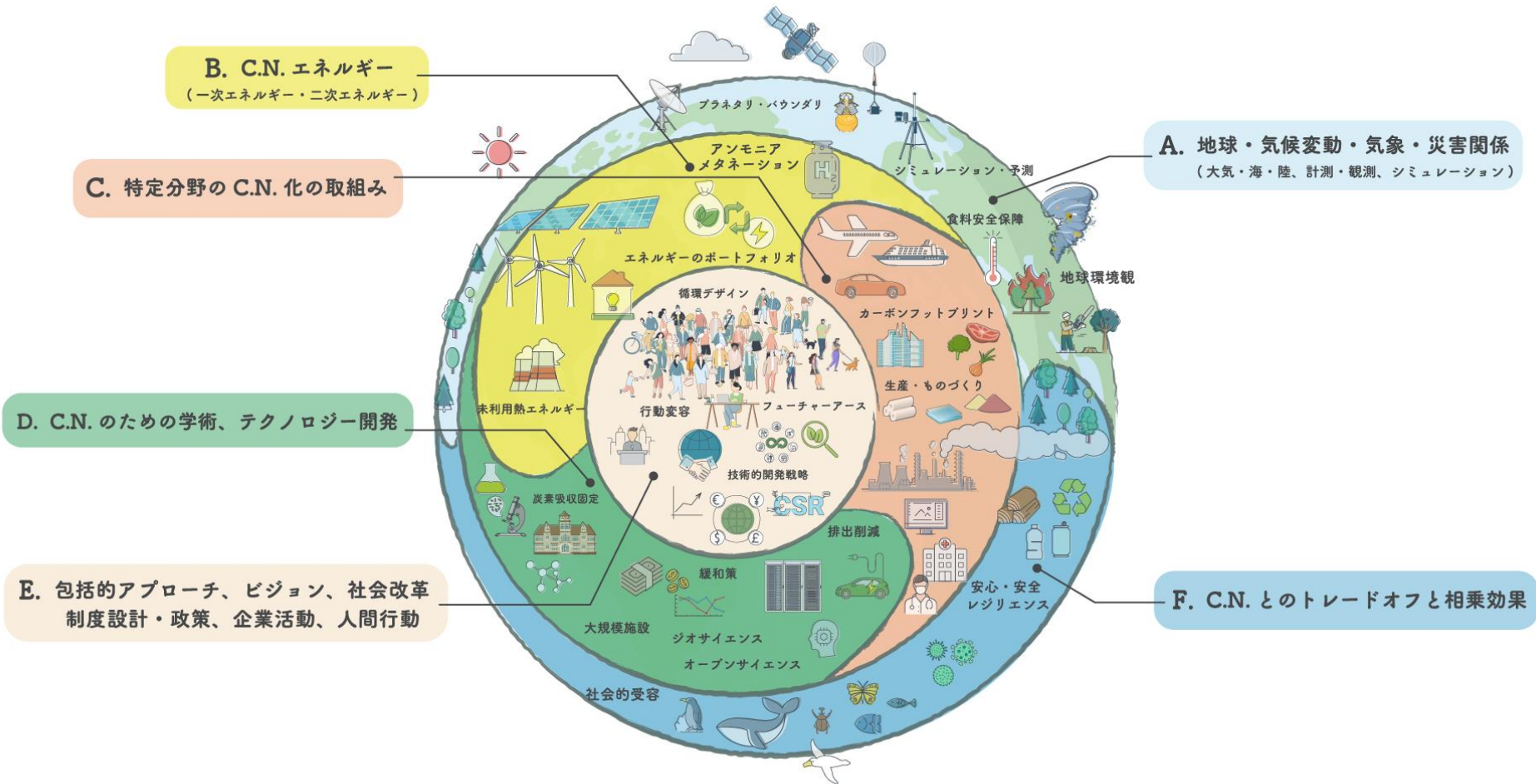
## D. C.N.のための学術、テクノロジー開発

- 1.炭素吸収固定、2.排出削減、3.緩和策、4.材料・素材、5.物理・化学・数理科学等、6.経営・金融、7.システム・シミュレーション・可視化、8.大規模施設、9.電力系統等のシステム制御、10.オープンサイエンス、11.ジオサイエンス

## G. 学協会連携

## H. 国際連携・国際的プレゼンス

# 日本学術会議におけるカーボンニュートラル(C.N.)活動の俯瞰図



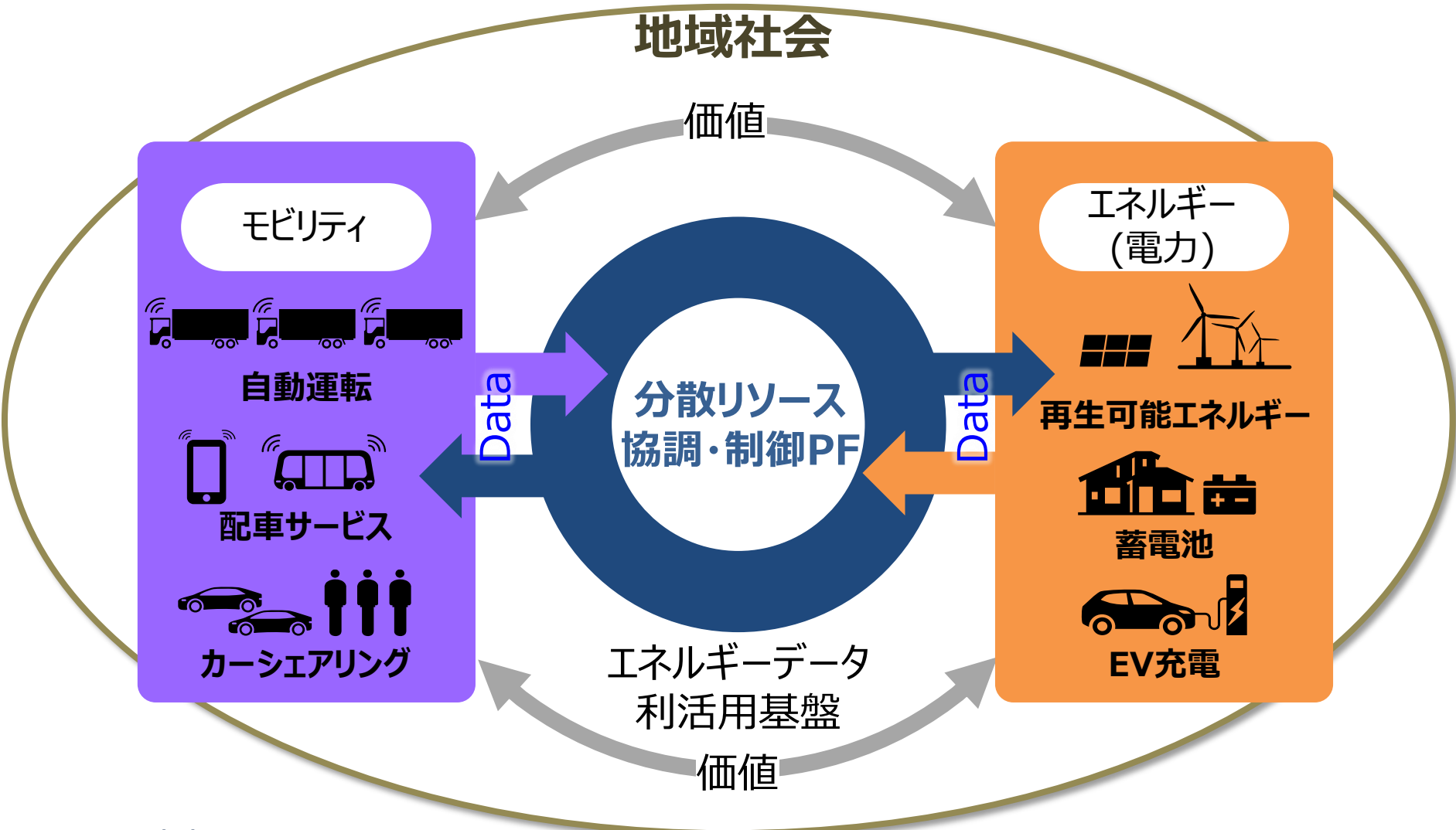


- ✓ 地域社会と基幹システムは、共存を前提として再構築
- ✓ 急増する分散リソースを統合する協調メカニズムの確立

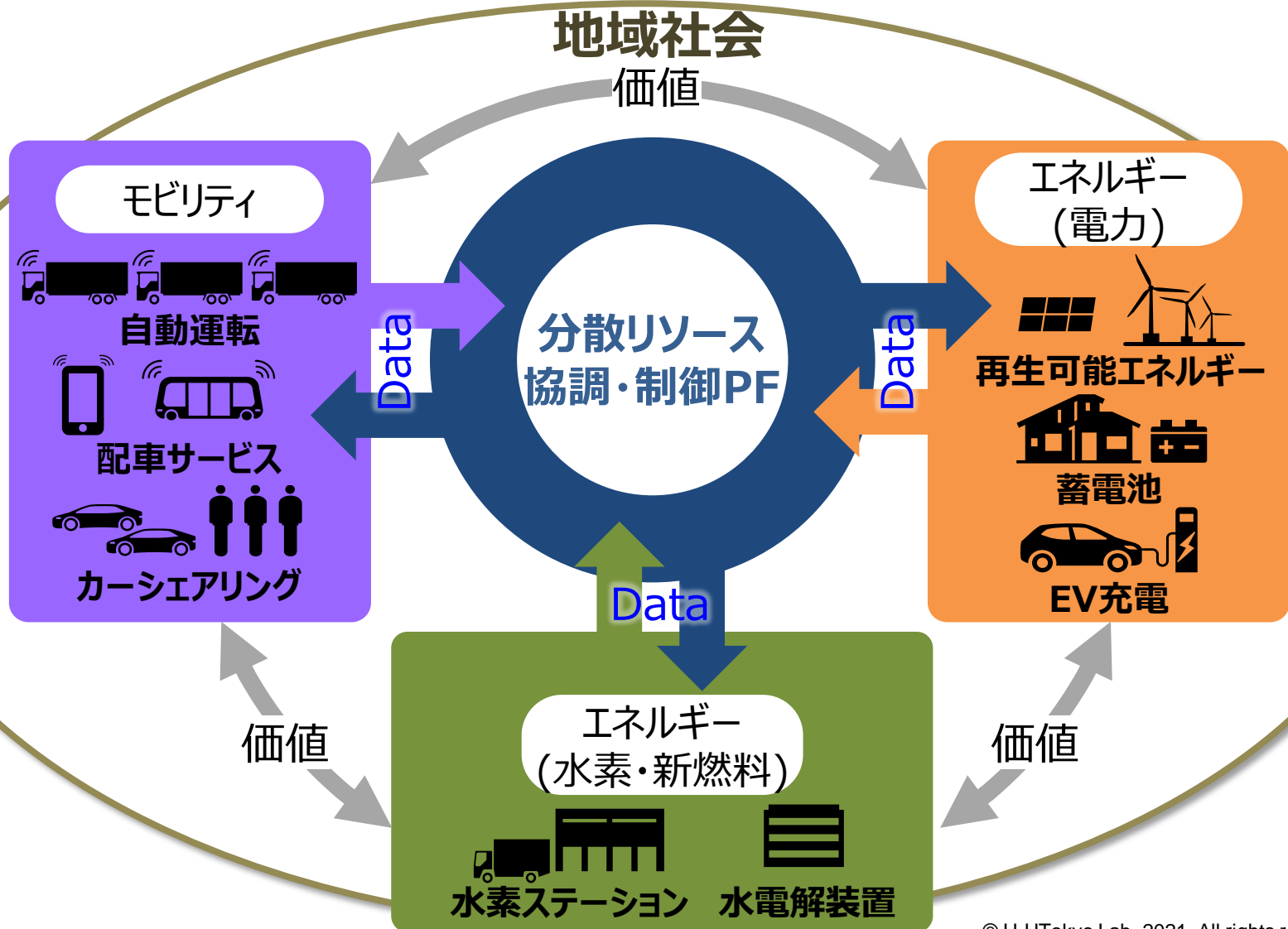
社会全体の3E+Sを最適化



EV普及、MaaS進展で、エネルギーとモビリティのサービスが互いに価値を創造する世界。モビリティ、エネルギーへの価値が地域社会への価値として還元



社会への水素・新燃料の普及により、新たな価値循環・創造が可能





文部科学省・「富岳」成果創出加速プログラム  
「スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用」(2020.4-2023.3)

## 洋上大型風車のスーパーシミュレーション

山田知典、金子栄樹、加藤千幸（東大）、陳順華（中山大學）、  
遊佐泰紀(電通大)、飯田明由(豊橋技科大)、内田孝紀・小野謙二(九大)、  
山出吉伸（みずほR&T）、淀薫（インサイト）、湯山喜芳（AE）

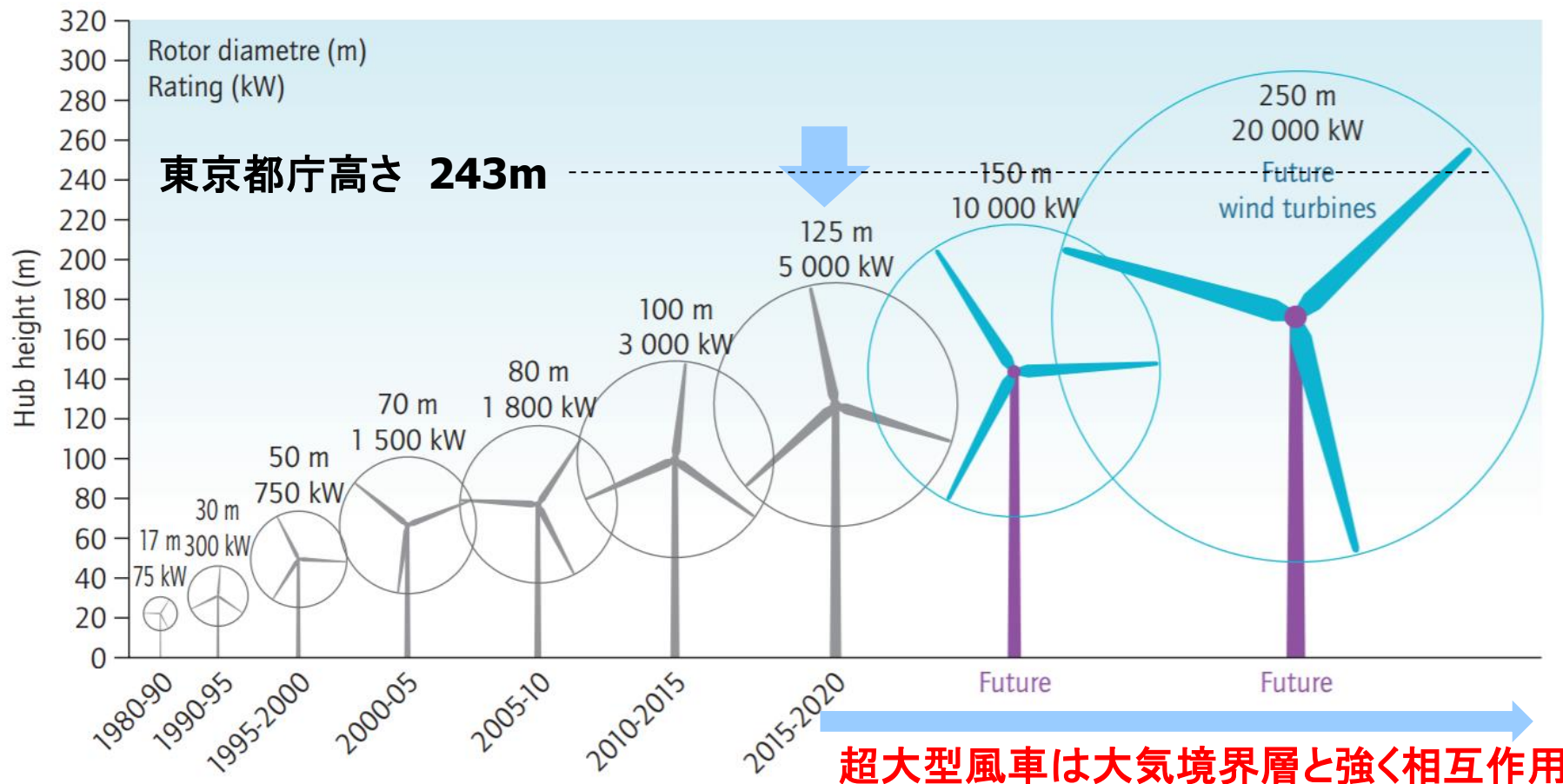


東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO

# 発電用大型風車が立ち並ぶ洋上ウィンドファーム

➡ 発電効率向上のため、次第に大型化する発電用風車  
(発電効率は、翼長の2乗に比例、風速\*の3乗に比例)

\* 日本周辺海域の特殊性: 欧米と比べて平均風速は低いにも関わらず、乱流強度が高く、しばしば台風等の強風に襲われる

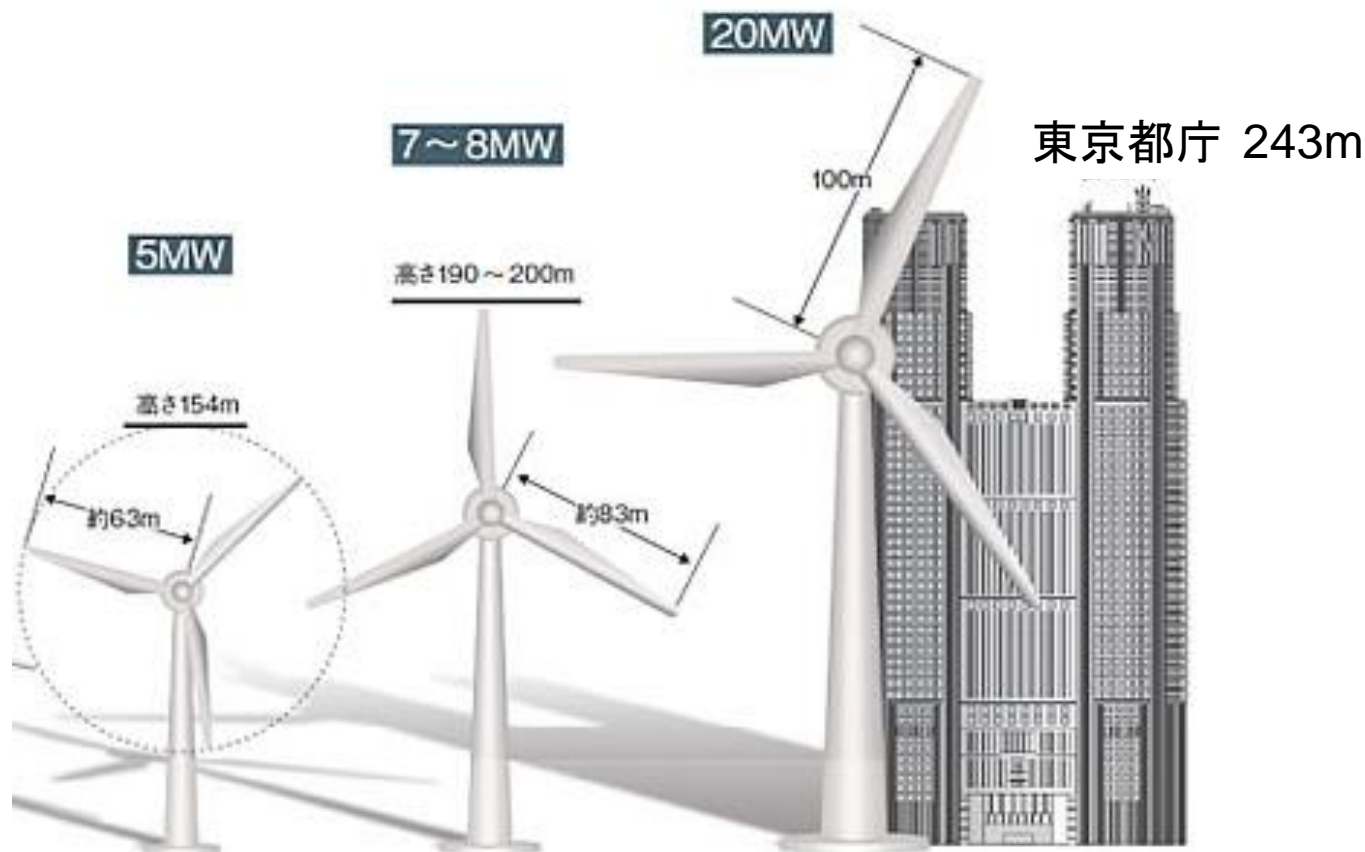


IEA. Wind energy technology roadmap, 2013 edition.

URL: [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind\\_2013\\_Roadmap.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind_2013_Roadmap.pdf).



# 発電効率向上のため、次第に大型化する発電用風車



2012年までの  
最大規模

2013~2014年の  
最大規模  
(Vestas社と三菱重工業がそれぞれ実用化へ)

2020年の  
推定最大規模

回転数 約12 rpm (1回転/5秒)  
約 $10^8$ 回転/20年

Boeing777-200 最大務燃料重量**191ton**  
全長63.7m、全幅60.9m

5MWブレード一枚 重量**17ton**、長さ**61.5m**  
15MWブレード一枚 重量**65ton**、長さ**117m**

# 洋上ウィンドファームにおいて解決すべき課題

➔ 徹底した発電コスト削減

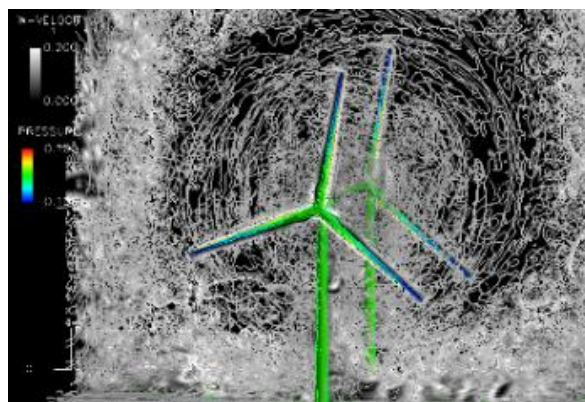
■ 後流(Wake)による下流側風車の**発電性能低下**

➔ 後流を介した風車間相互干渉を考慮したサイト毎の洋上ウィンドファームの**発電性能の予測精度向上**

■ 洋上ウィンドファームの大型風車の**構造信頼性の向上/寿命延伸(20年 ➔ 25年以上)**

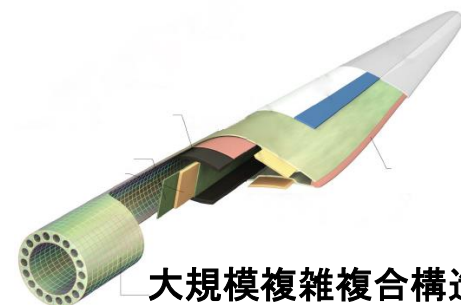


洋上ウィンドファーム(Horns Rev 1)の後流



タンデム配置された風車の後流干渉

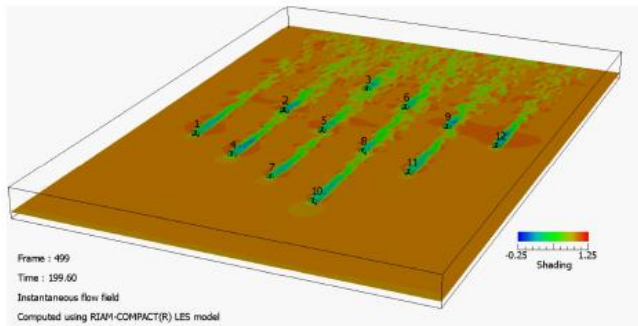
2016年の台風18号の強風(40m/s)によって壊れた5MW風車  
(韓国チェジュ島)



大規模複雑複合構造の翼



# 洋上ウィンドファームの発電性能、構造信頼性評価

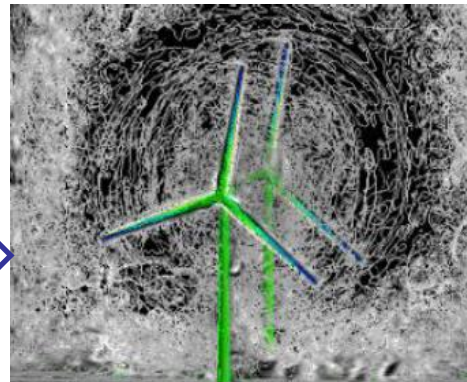


LES解析による詳細計算結果  
を用いたActuator Line Model  
の高精度化

LES解析による詳細計算結果を用いた  
高精度工学Wakeモデル構築

## RC HPC版

- ・ウィンドファーム全体の16(24)方位風向同時並列LES解析
- ・サイト毎の風車配置に対応する発電性能評価
- ・工学風車モデル (Actuator Line Model)
- ・数億～数十億要素



**FFB**: タンデム配置される大型風車まわりの流れ場の詳細LES解析  
・数百億要素

双方向連成  
ブレードの変形  
(→LES解析)

**REVOCAP\_Coupler**  
並列カプラー

片方向連成

風車ブレード等に作用する流体力(空間分布・時間変化)

**ADVENTURE\_Solid**:  
数10万積層ソリッド要素による大型ブレードの累積疲労損傷計算<sub>16</sub>



# スーパーコンピュータ「京」から「富岳」へ

## ■ 京 (2012-2019)

ノード数 : 128 GFLOPS CPU,  
128-bits SIMD (2GHz) x 8 コア  
演算性能 : **10.51 PFLOPS** for  
**88,128 CPUs** (705,024 コア)

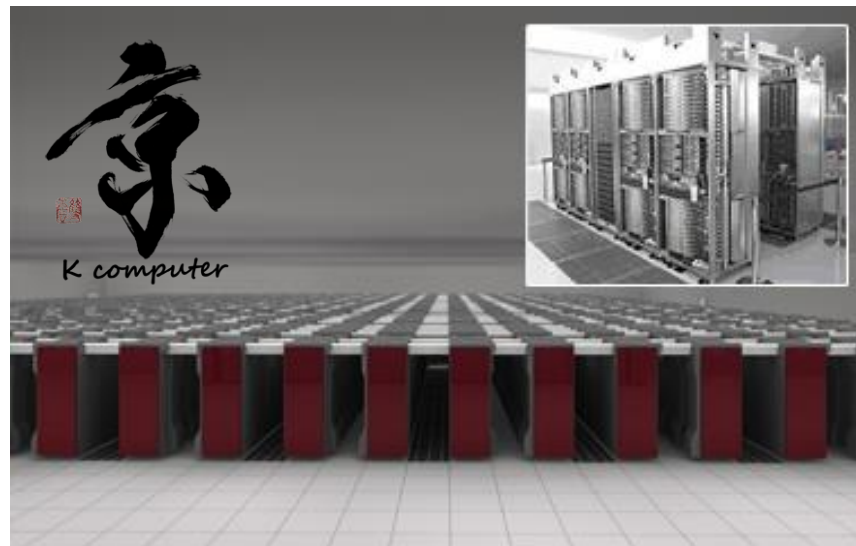
## ■ 富岳 (2020-)

ノード数 : 3,380 GFLOPS CPU,  
512-bits SIMD (2GHz) x 48 コア  
演算性能 : **442.01 PFLOPS** for  
**158,976 CPUs**

## ■ 2020年、2021年の6月と11月

演算速度 世界1位

■ HPCG, HPL-AI, Graph 500の他の  
3カテゴリでも世界1位



# 代表的な連成現象（固体に着目した場合）

(a) 流体－構造連成

（FSI: Fluid-Structure Interaction）

(b) 熱－流体－構造連成

(c) 電磁－構造連成

(d) 電磁－流体－構造連成

(e) 音響－構造連成

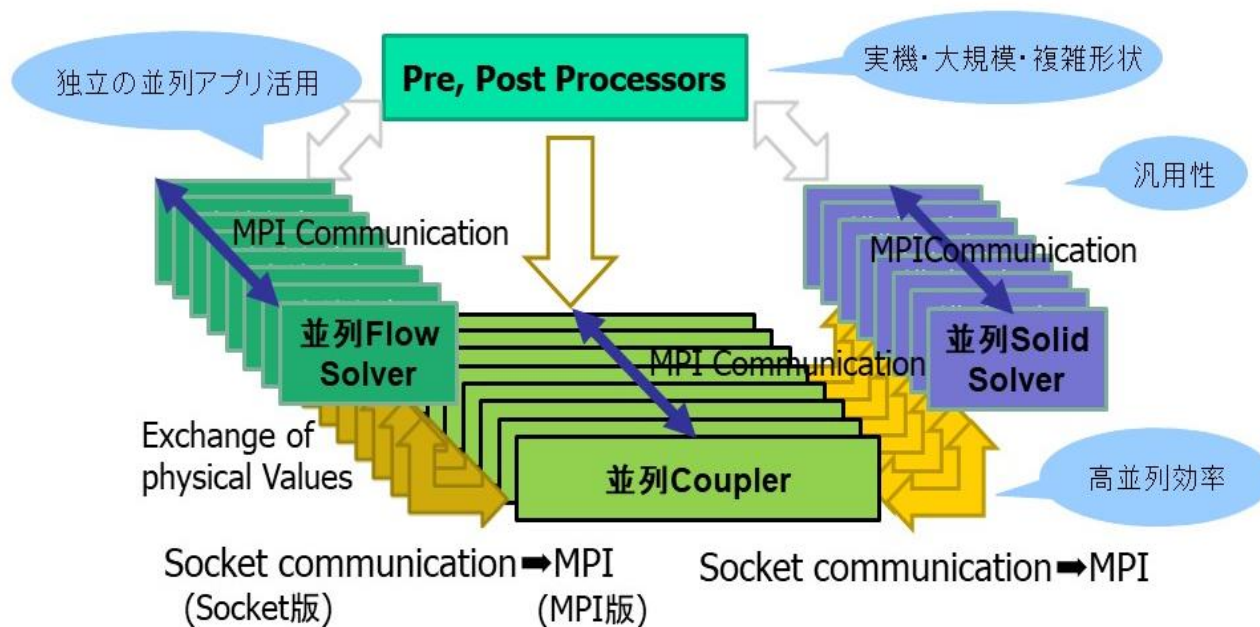
(f) 地盤－構造連成

(g) 制御－構造連成

(h) 電磁－音響－制御－構造連成



# コアテクノロジー：汎用×並列×連成 on 富岳



ADVENTURE\_Coupler / REVOCAP\_Coupler を用いると、ほぼ同一の手順で、

- (1) オフライン片方向連成解析
- (2) オンライン片方向連成解析
- (3) 互い違い型双方向連成解析
- (4) 分離反復型双方向連成解析

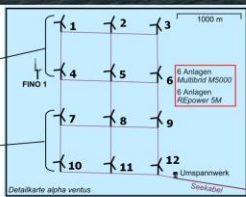
を実行できる。

# 実機スケール5MW風車のウエイクシミュレーション

## RC HPC版とFFBとの比較

### Alpha Ventus Offshore Wind Farm(独) (5MW × 12基)

Actual photo

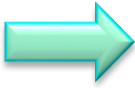
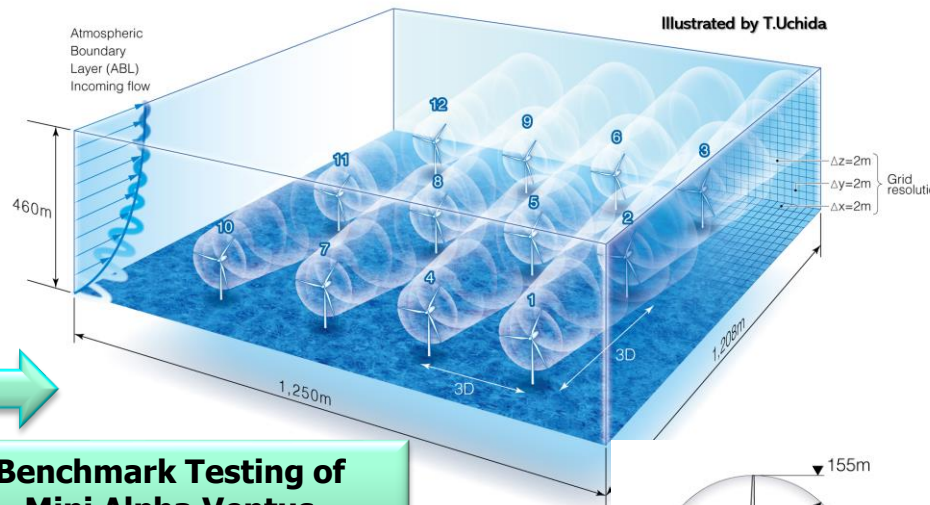


- Row 1 and 2 (1-6)  
Repower 5M  
Rotor diameter : 126m  
Hub height : 92m
- Row 3 and 4 (7-12)  
AREVA M5000  
Rotor diameter : 116m  
Hub height : 91.5m

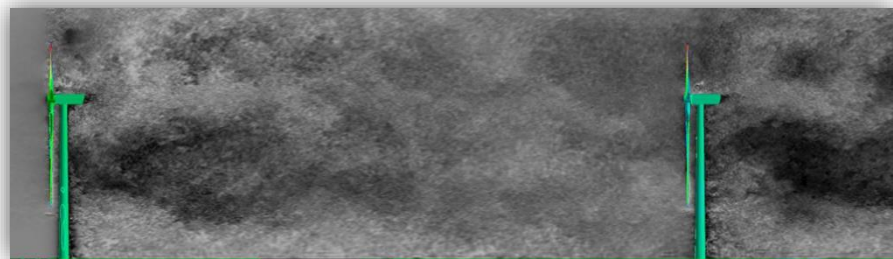
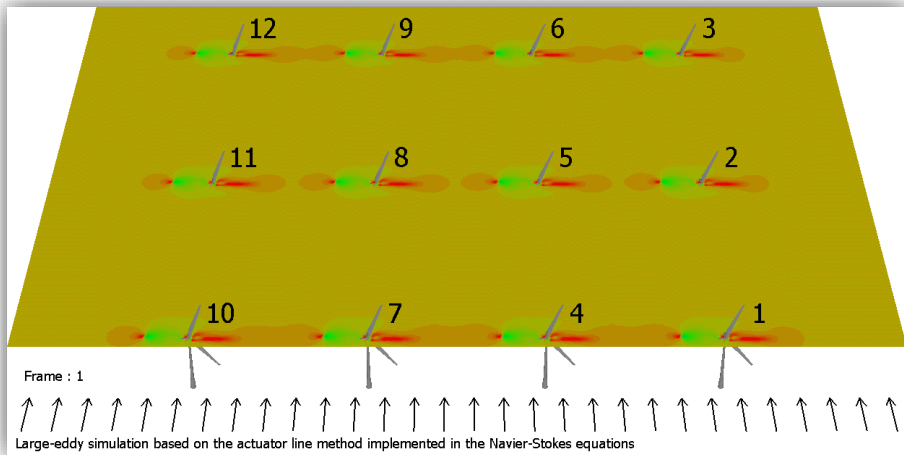
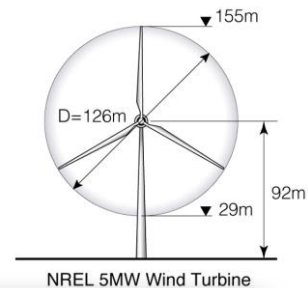


Umspannwerk:変電所

<http://www.adwenoffshore.com/portfolio-item/alpha-ventus/>



### Benchmark Testing of Mini Alpha Ventus (12 Wind Turbines)



### FFB (Fully resolved)



### RC HPC版 (Actuator Line Model)

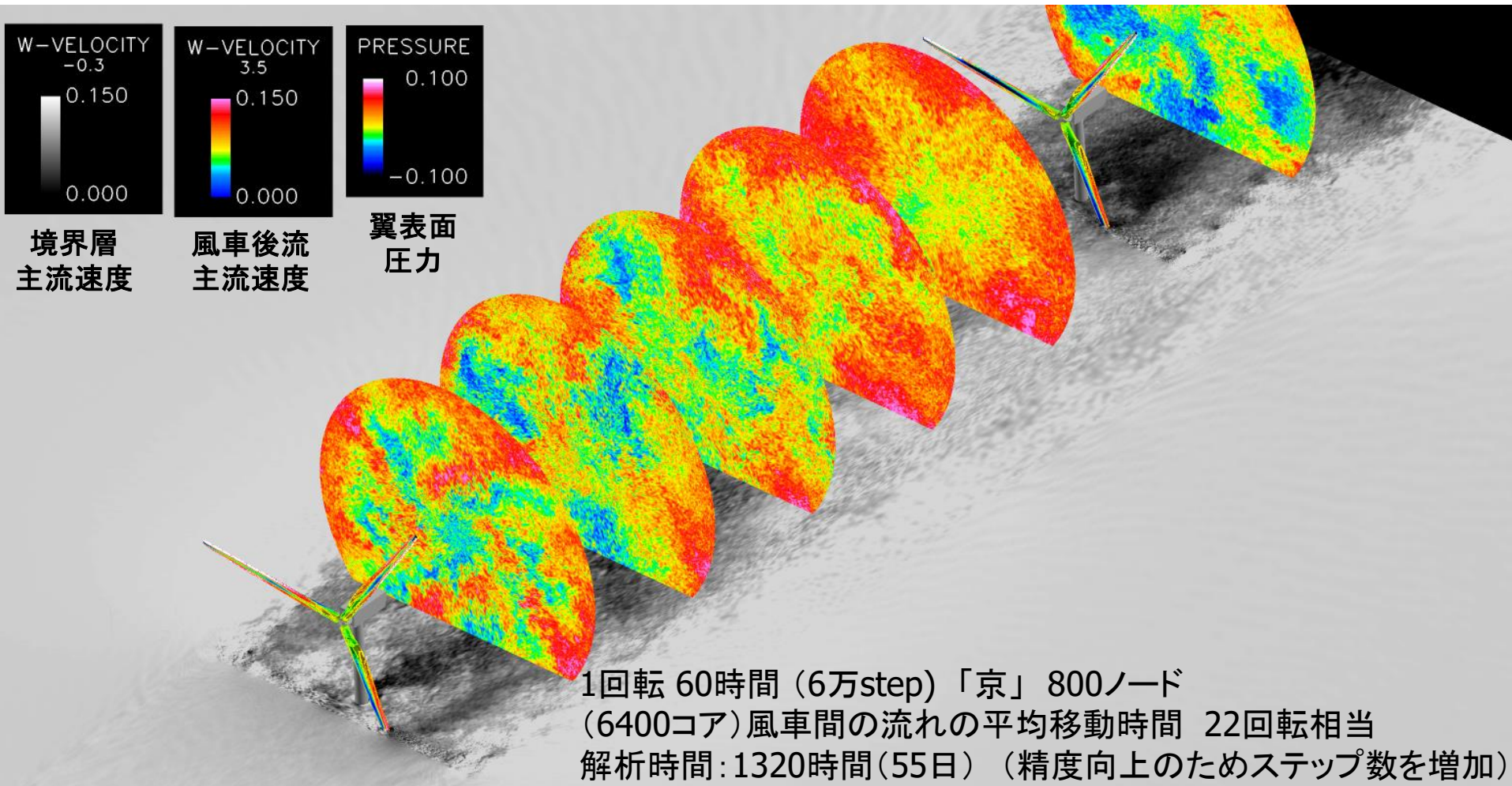


Flow (N=10)



# FFBによるタンデム配置(3D)風車周りの流れ解析

風車間隔3D、流入風速 一様、要素数6.35億、節点数 6.3億



富岳 512ノード(24576コア) → 1回転 10 時間 220時間(9日)  
10万ノード時間積

# 風車ブレードの種々の破損モード

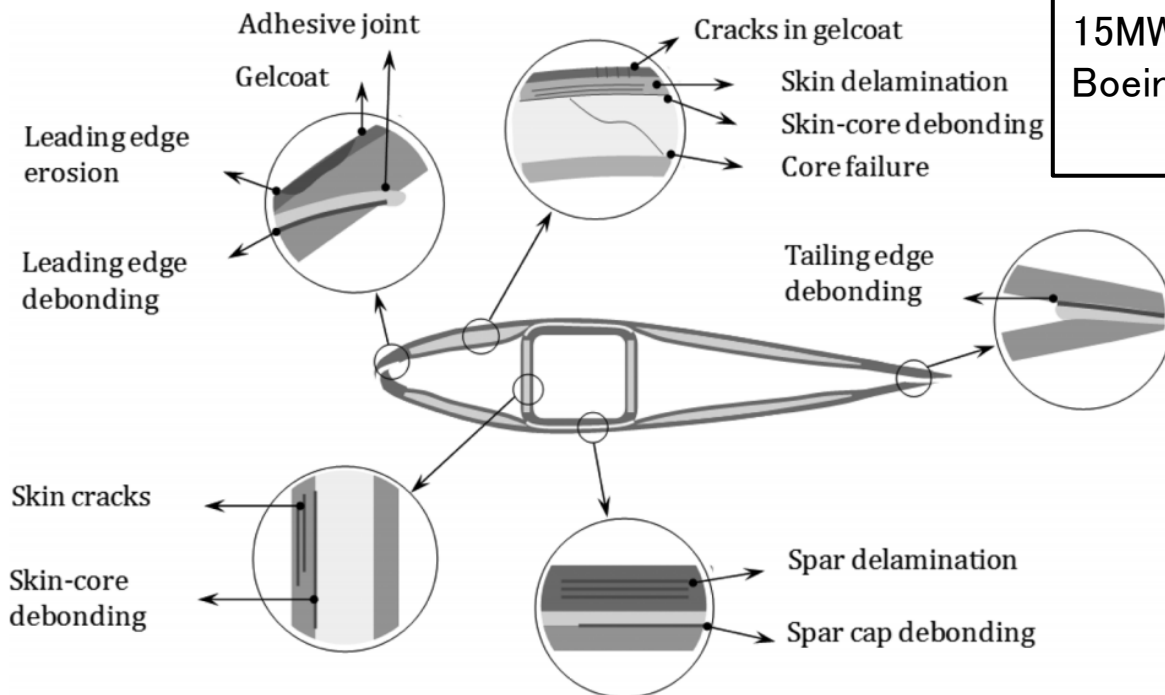
- 通常風力(大気変動、乱流、シェア、後流)、暴風、台風 → **日本近海の風況の特徴: 低い平均風速 & 強い乱流強度、時折訪れる暴風・台風**
- 損傷メカニズム



激しい暴風雨によって破損したブレード

- ✓ **面内損傷モード** (ゲルコート内き裂等)
- ✓ **板厚貫通モード** (スパー剥離、脱着)

5MWブレード一枚 重量**17ton**、長さ61.5m  
15MWブレード一枚 重量**65ton**、長さ117m  
Boeing777-200 最大務燃料重量**191ton**、  
全長63.7m、全幅60.9m

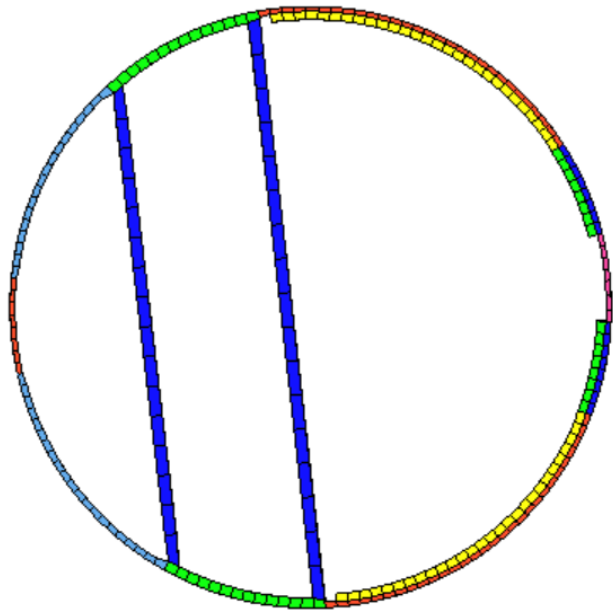


URL:

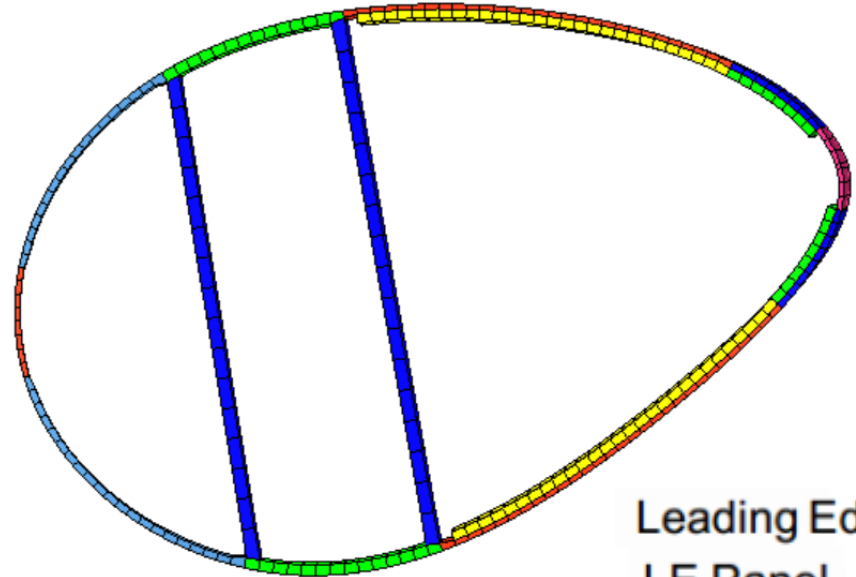
<https://blackburnnews.com/sarnia/sarnia-news/2015/08/03/storms-reportedly-damage-wind-turbine/#!prettyPhoto>.

Katnam K B, Comer A J, Roy D, et al. Composite repair in wind turbine blades: an overview[J]. The Journal of Adhesion, 2015, 91(1-2): 113-139.

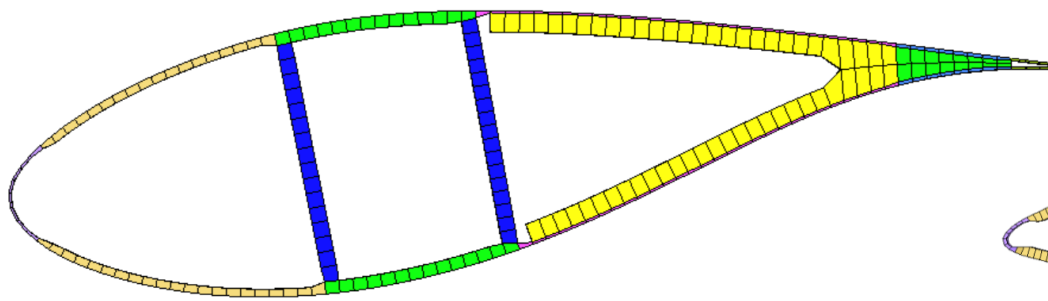
# ブレード詳細構造モデルの断面



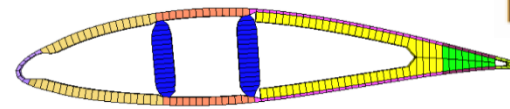
(a) 1.0 m span



(b) 7.1 m span



(c) 30.0 m span

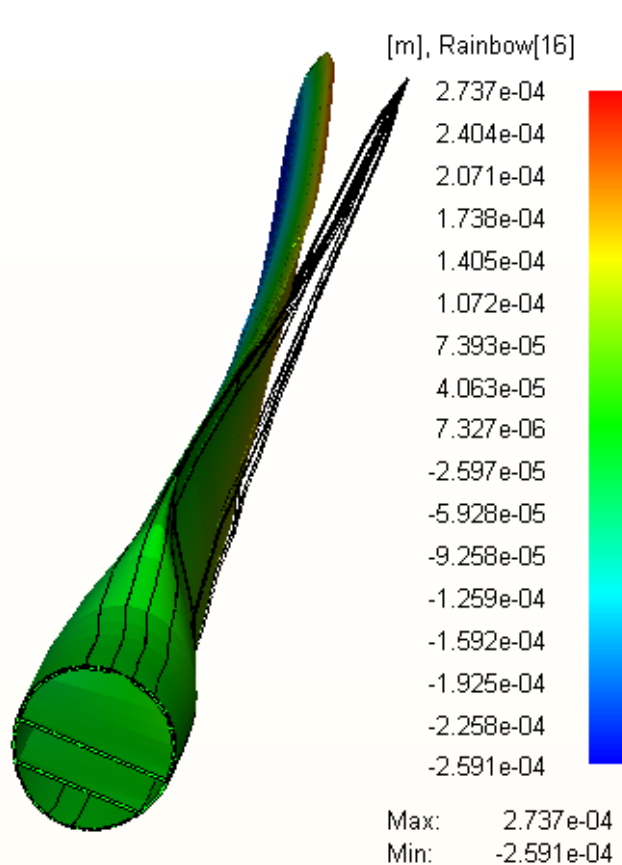


(d) 60.0 m span

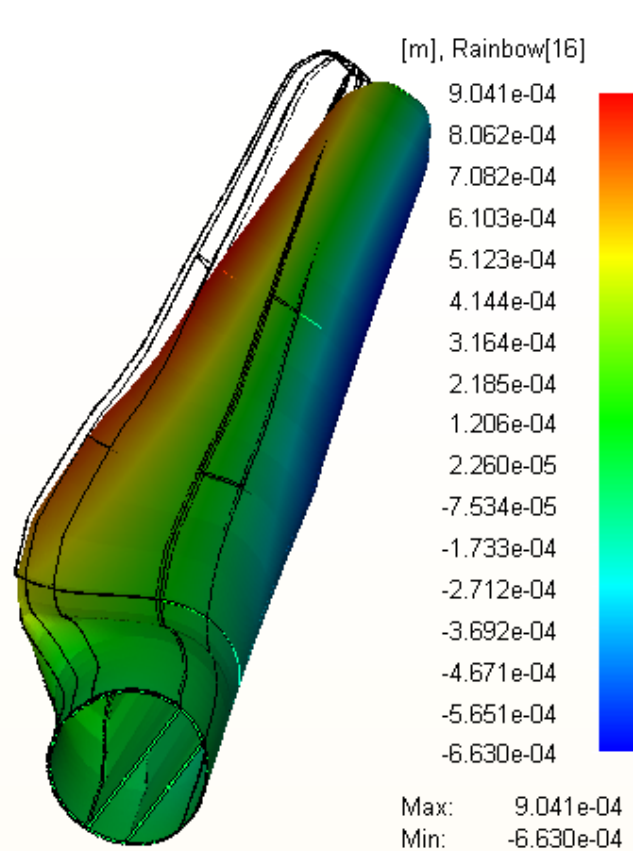
- Leading Edge (LE)
- LE Panel
- Spar Cap
- Shear Web
- TE Panel
- TE Reinforcement
- Trailing Edge (TE)



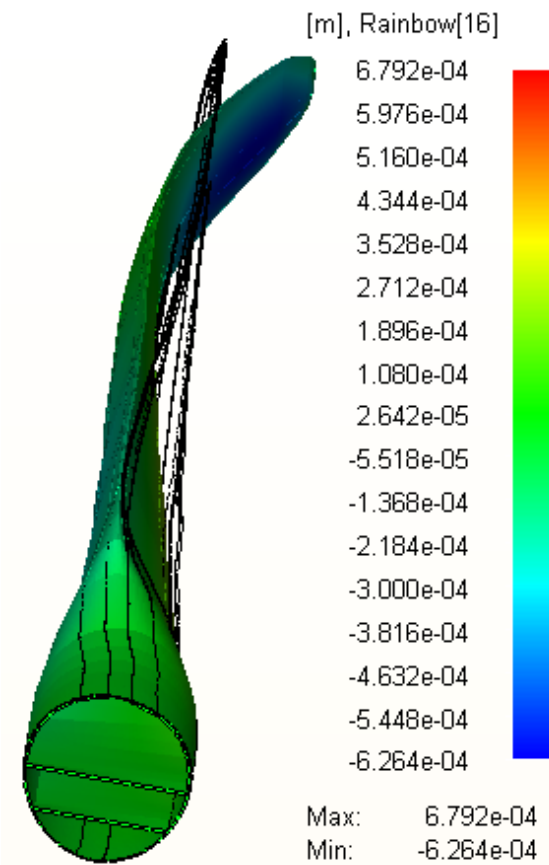
# ブレード詳細構造モデルを用いた固有値解析(2/3)



モード1  
0.8Hz



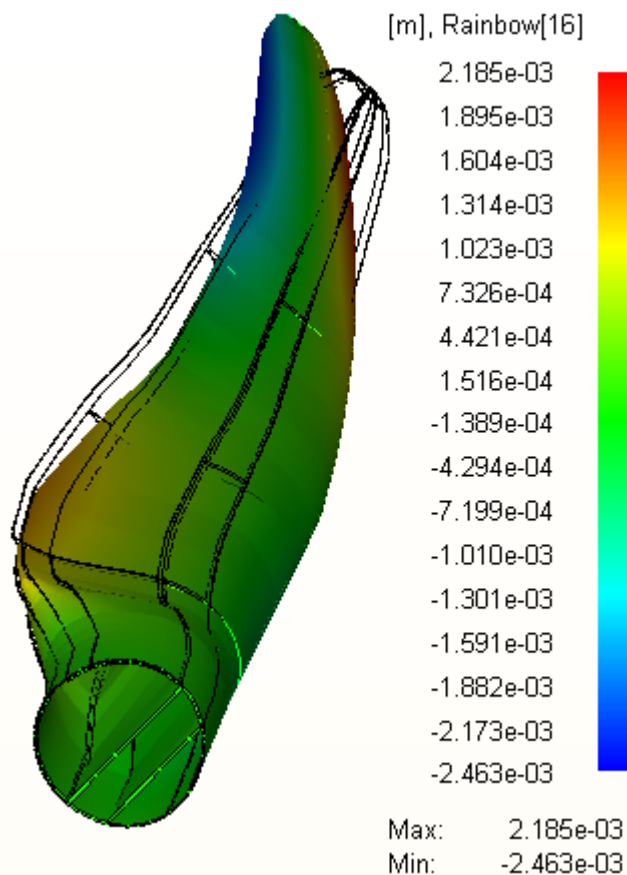
モード2  
0.98Hz



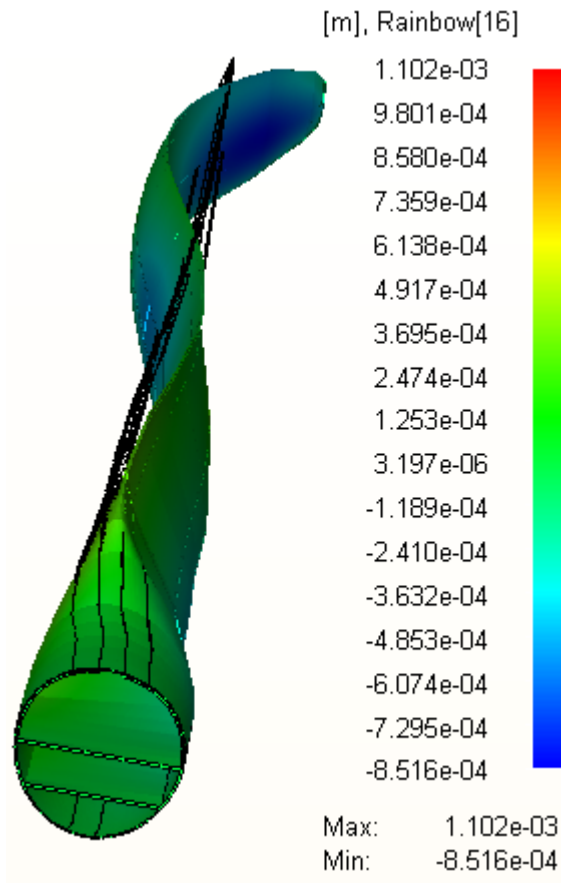
モード3  
2.28Hz

変形は50倍に拡大

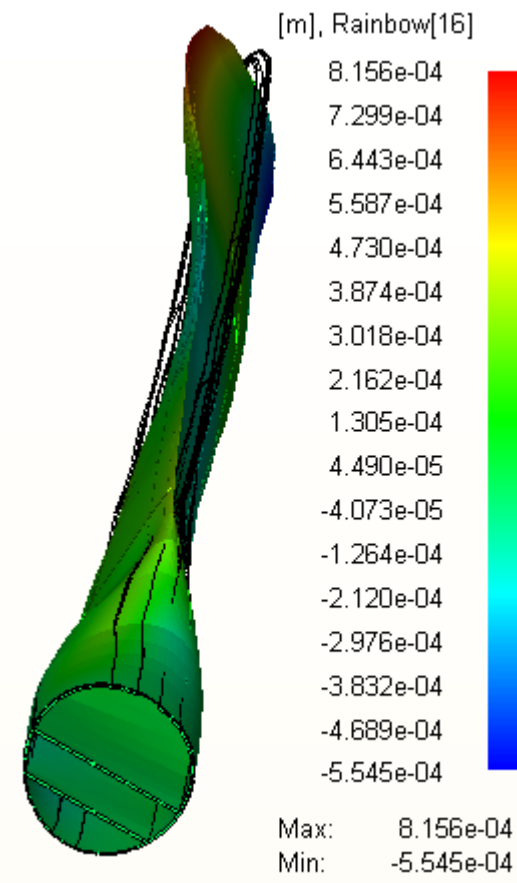
# ブレード詳細構造モデルを用いた固有値解析(3/3)



モード4  
3.43Hz



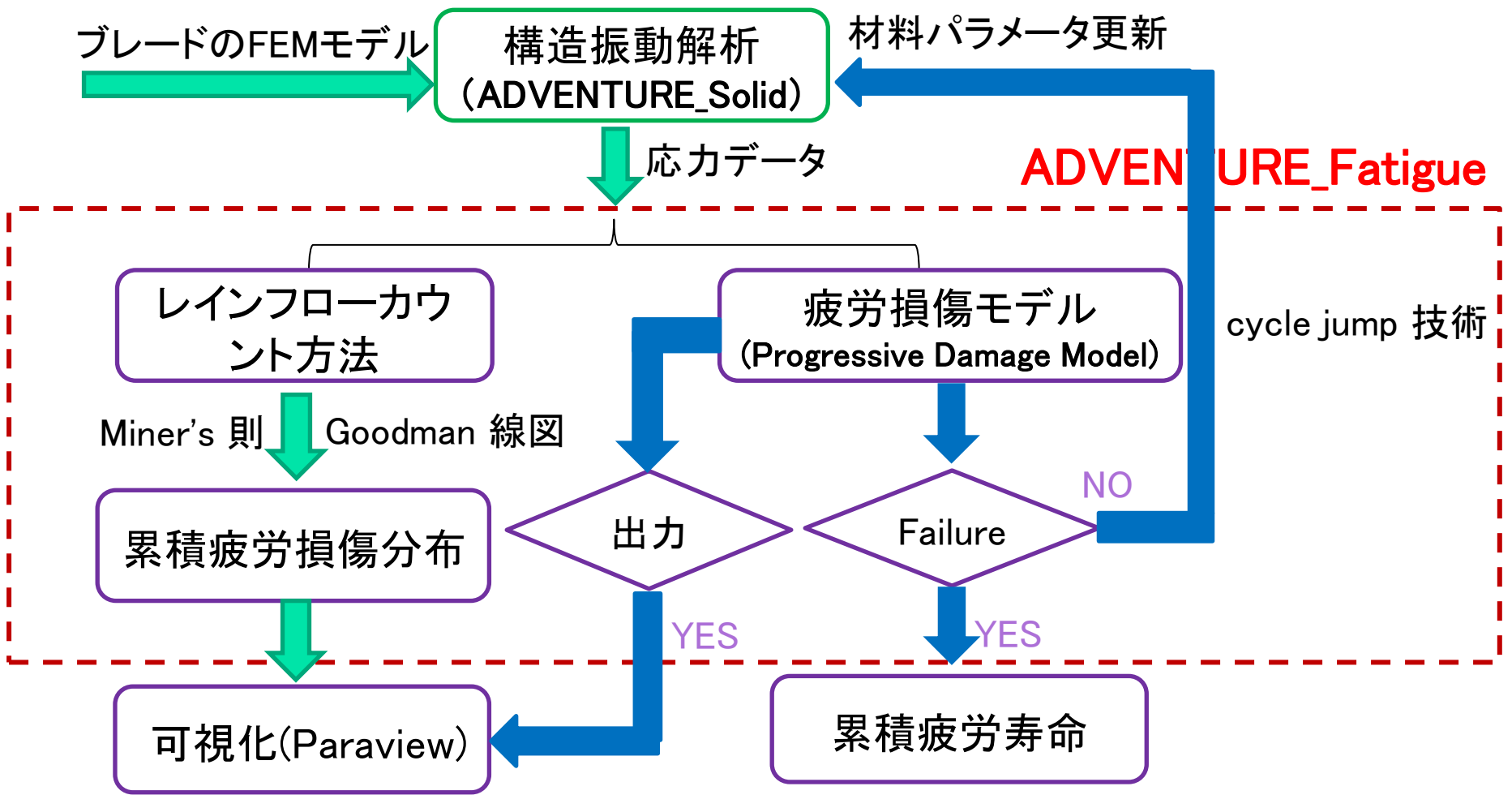
モード5  
5.13Hz



モード6  
7.39Hz

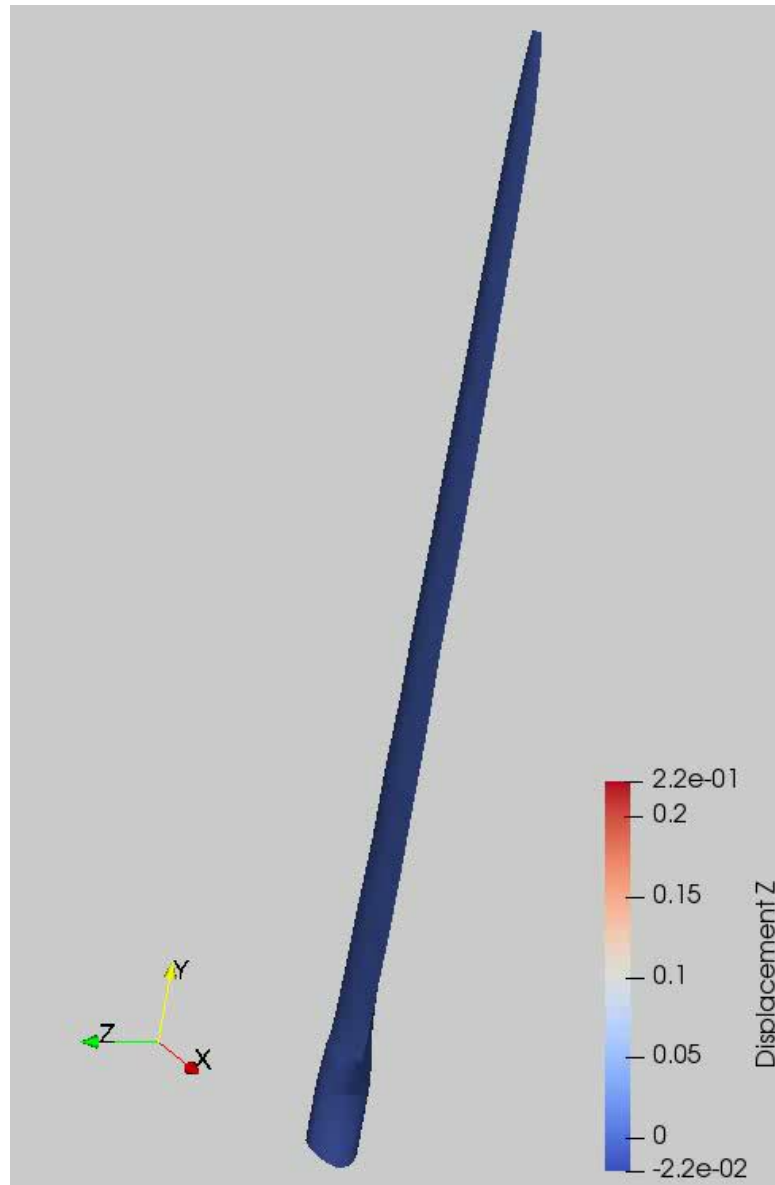
変形は50倍に拡大

# ADVENTURE\_Fatigueのフローチャート



# 後流を受けて振動するNREL5MWブレード

可視化のために  
変位を10倍に拡大



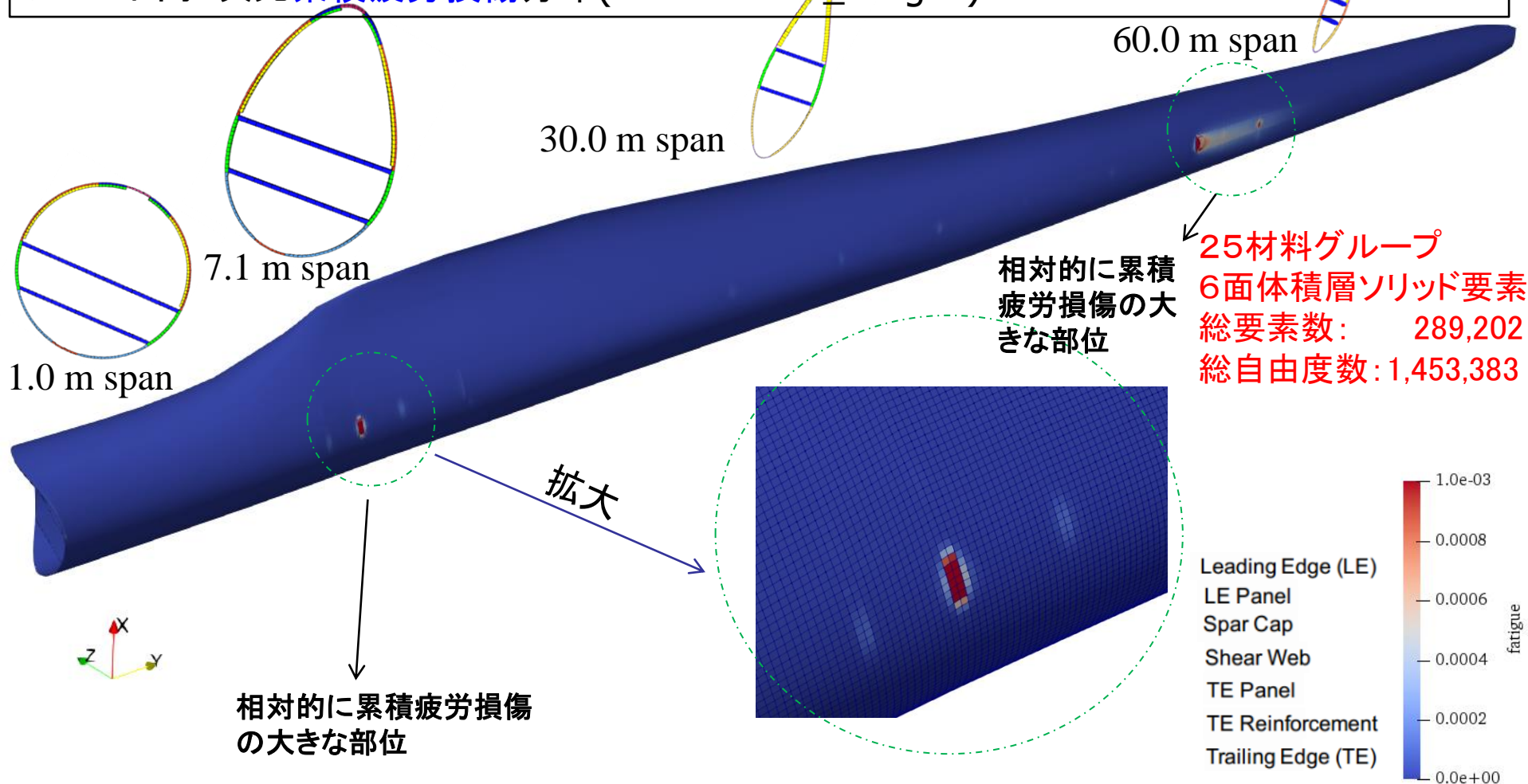
# NREL5MWブレードの累積疲労損傷評価例 (TSR=7, 20年間)

ブレード表面に作用する流体力分布、時刻歴 (FFB) ← 大気境界層・乱れ、後流(wake)

ブレード内3次元応力分布、時刻歴 (ADVENTURE\_Solid)

← レインフローカウント + Goodman線図 + S-Nカーブ + 年間風況履歴

ブレード内3次元累積疲労損傷分布 (ADVENTURE\_Fatigue)







文部科学省・「富岳」成果創出加速プログラム  
「スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用」(2020.4-2023.3)

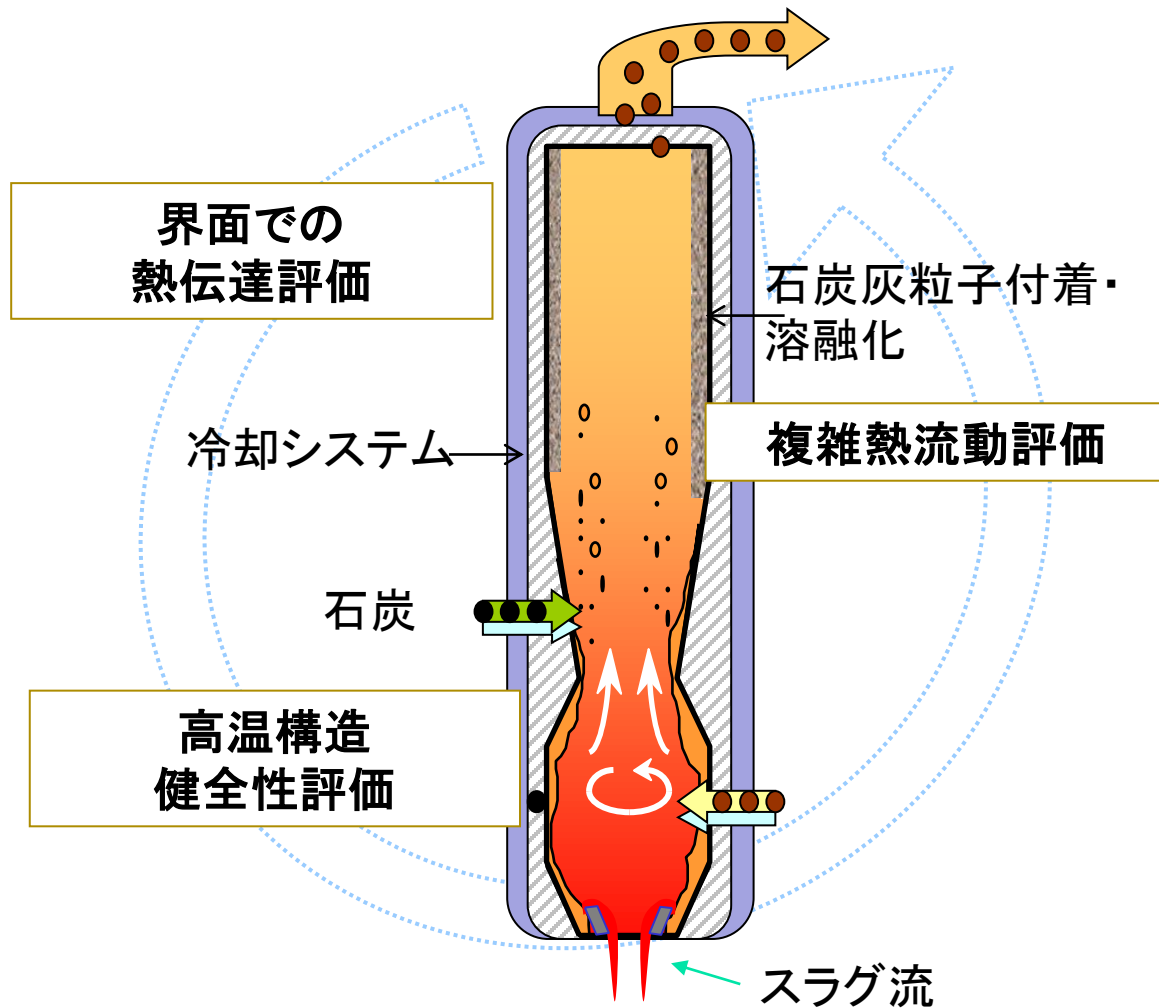
## 石炭ガス化炉のスーパーシミュレーション

山田知典、金子栄樹(東大)、渡邊裕章(九大)、黒瀬良一(京大)、  
吉田隼也(NuFD)、淀薫(インサイト)、湯山喜芳(AE)、小池邦昭(ASTOM)、  
宮村倫司(日大)、河合浩志(東洋大)、荻野正雄(大同大)、武居周(宮崎大)

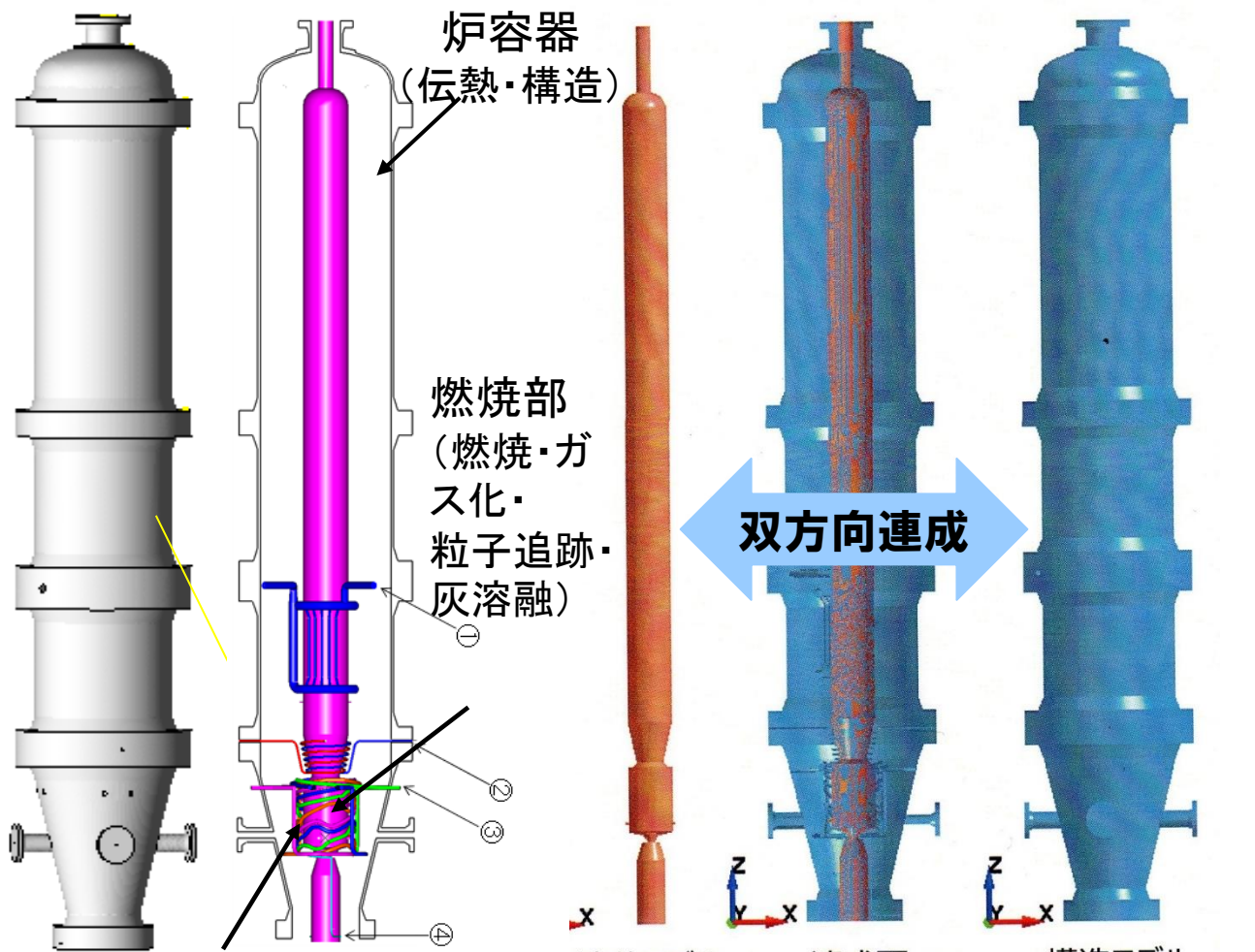


東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO

# 石炭ガス化炉の概念図



# ラボスケール石炭ガス化炉(電中研炉)の反応(燃烧・ガス化・粒子追跡・灰溶融)・伝熱・冷却、変形解析



冷却管(移流拡散)

炉容器  
(伝熱・構造)

燃烧部  
(燃烧・ガス化・  
粒子追跡・  
灰溶融)

双方向連成

流体モデル

連成面

構造モデル

FFR-Comb (FVM, LES)    REVOCAP\_Coupler (並列双方向連成)    ADVENTURE (FEM)

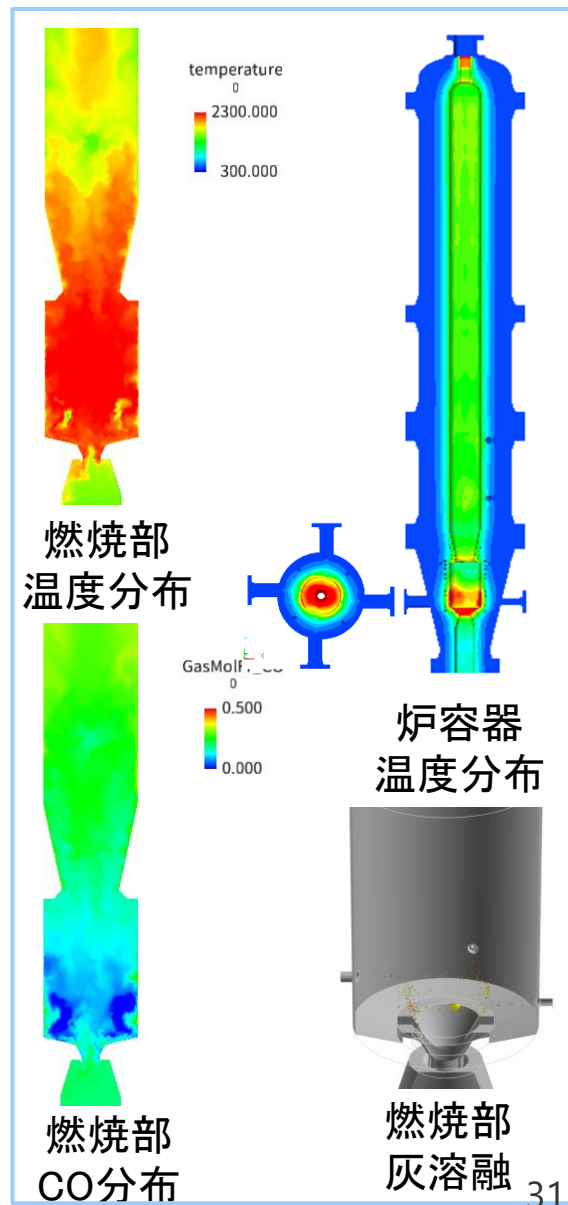
1.19億要素    63万流体節点

1.56億要素

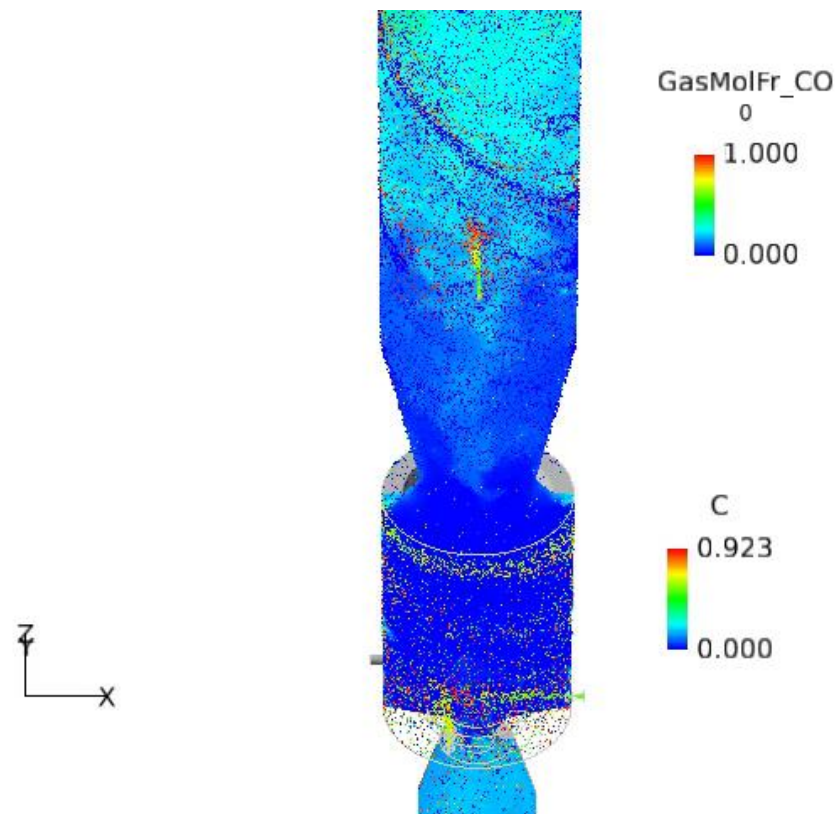
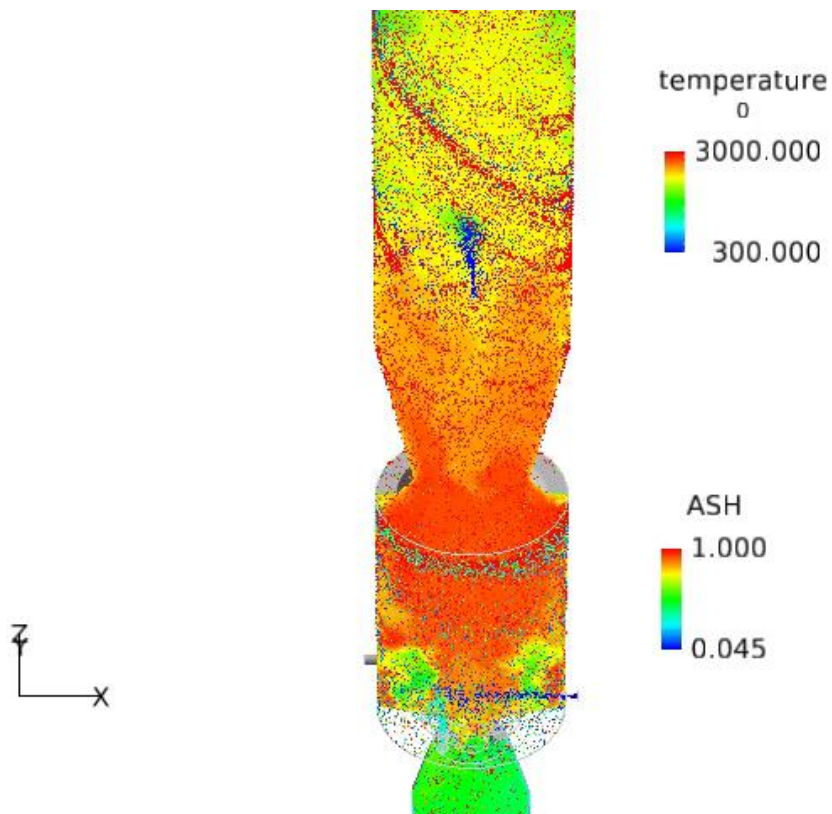
$\Delta t=10^{-6}$

24万構造節点

$\Delta t=10^{-2}$

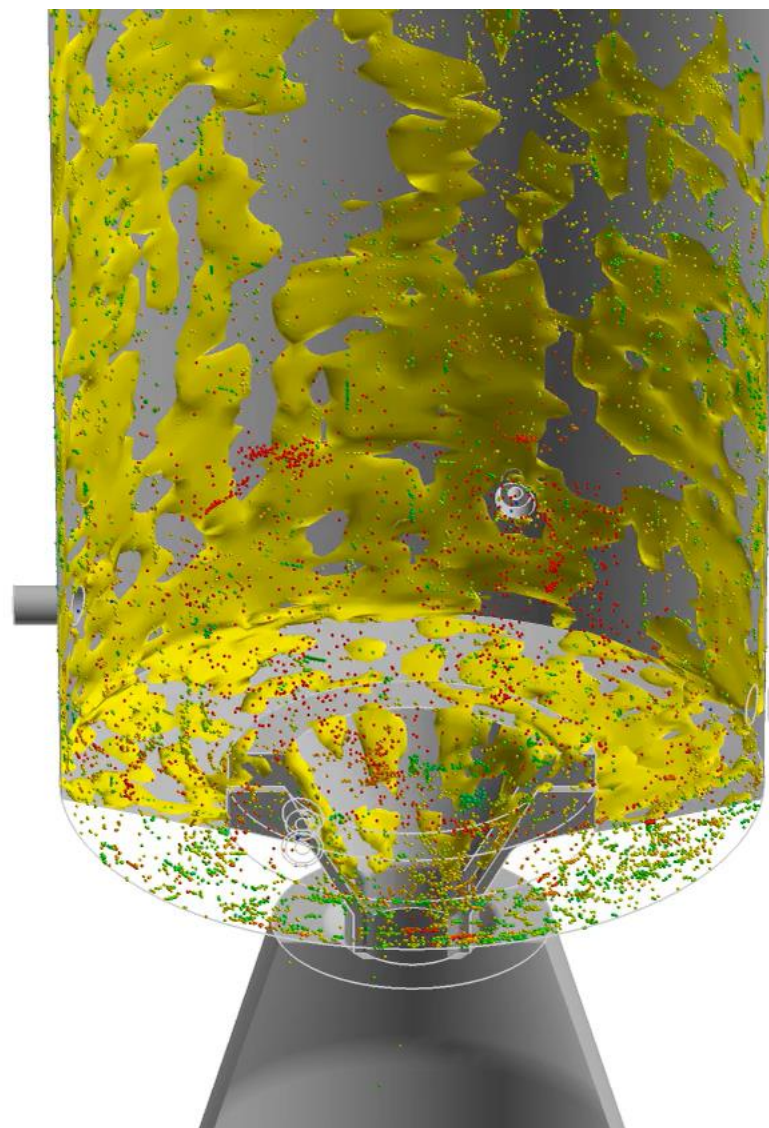


# 双方向連成解析の温度分布、CO分布、灰成分分布等



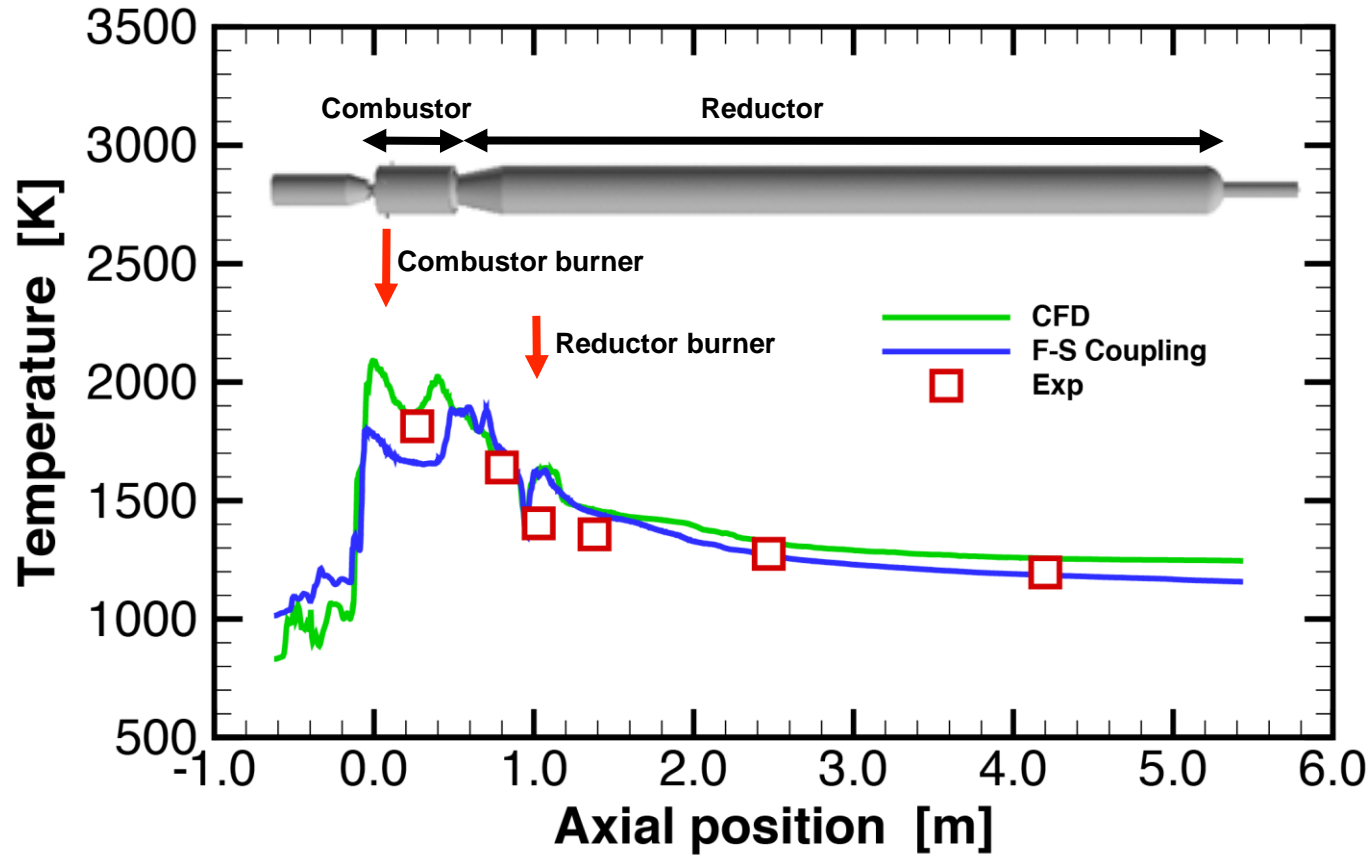


# コンバスタ部の粒子分布およびスラグ層の形成



# 電中研炉の解析と実験結果との定量比較

## 中心軸上ガス温度分布



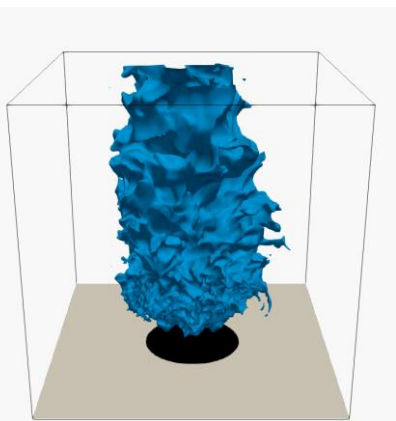
# 燃焼テーマのCN社会実現に向けての役割

文部科学省 富岳成果創出加速プログラム:

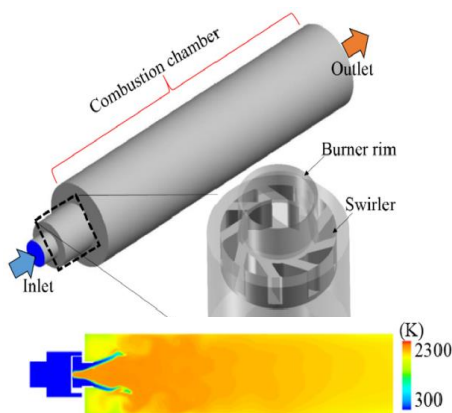
スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用 (次世代火力用アプリケーション)



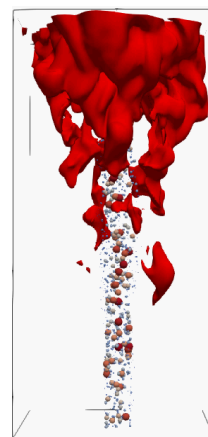
様々な新燃料の燃焼システム開発に貢献



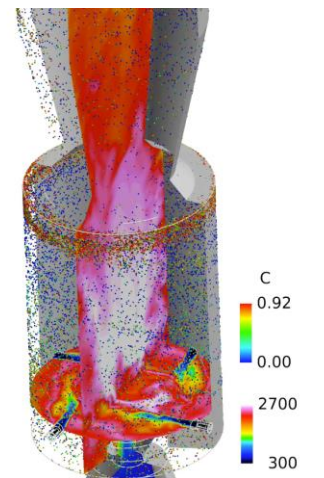
水素燃焼



アンモニア燃焼



バイオエタノール燃焼



バイオマスガス化  
及びCO<sub>2</sub>回収型 ポリジェネレーション  
システムの構築

# おわりに

「Society5.0×カーボンニュートラル×レジリエントな社会」の実現に向けて、やるべきことは多数あり。そのいずれに対しても、**材料力学、計算力学、連成解析**の果たすべき役割は大きい。一つ一つの自発的・自律的で総意工夫に富んだ学術・技術の研究開発と、将来の社会ビジョンとそこからバックキャストिंगによって引き出される社会シナリオの共有化を通して、個別学術・技術が連携する時、この目標を達成し、サステナブルな社会を達成できると考えている。





ご清聴ありがとうございました。

吉村・藤井研究室

<https://save.sys.t.u-tokyo.ac.jp>

ADVENTUREプロジェクト

<http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/>

富岳成果創出加速プログラム「クリーンエネルギー  
富岳プロジェクト(略称)」

<http://postk6.t.u-tokyo.ac.jp/>



東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO