

二種類の環境配慮型コンクリートを用いた 吹き付けドーム建築物の試行建設

巴 史 郎

2050年カーボンニュートラルの実現に向け、NEDOグリーンイノベーション基金を活用したカーボンリサイクル技術の開発の一環として、東京都調布市に二種類の環境配慮型コンクリートを用いた吹き付け工法によるドーム建築物を試行的に建設した。

高炉セメントC種相当のECMセメントを用いたECMコンクリート[®]（以下、本低炭素型コンクリート）およびCO₂と反応して硬化する特殊混和材を用いたCO₂吸収コンクリートを吹き付け、現場で炭酸化養生を実施しドーム建築物を完成させた。本ドームの試行建設により、本低炭素型コンクリートを使用した吹き付け工法の目途がついた。CO₂吸収コンクリートは、開発段階であり今後も適用拡大に向けた検討を継続する。

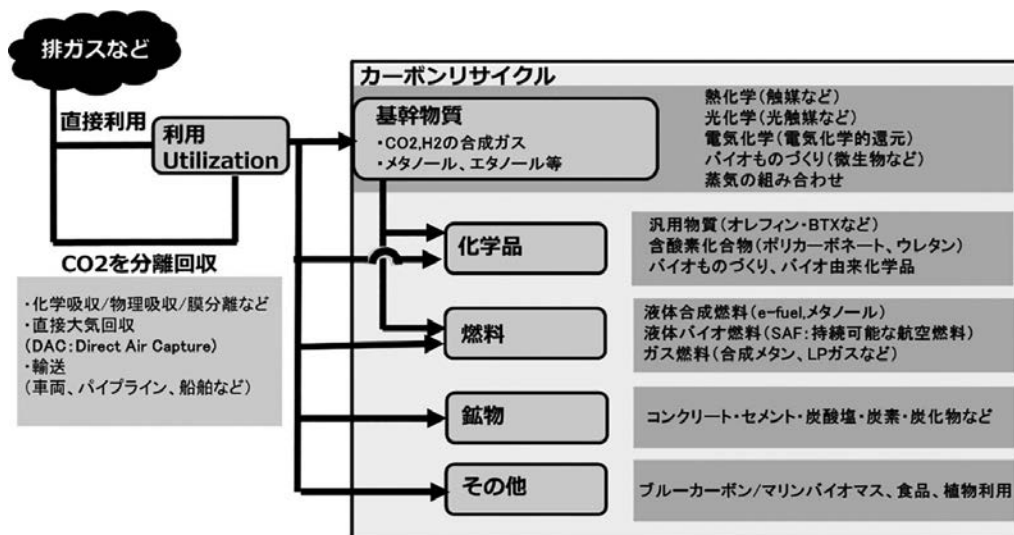
キーワード：カーボンリサイクル、ドーム建築物、炭酸化養生、環境配慮型コンクリート、CO₂吸収コンクリート、ECMセメント、高炉セメントC種、特殊混和材

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルの実現に向け、NEDO（（国研）新エネルギー・産業技術総合開発機構）に基金を造成し、最長10年間、研究開発・実証から社会実装までを継続して支援する目的でグリーンイノベーション基金（GI基金）が設立された。本ドーム建築物はこのGI基金を活用したコンソーシアムの事業の一環として試行的に建設したものである。

カーボンニュートラルの実現には、諸活動で排出さ

れたCO₂を有効に活用するカーボンリサイクル技術が必要となる。カーボンリサイクル技術には図—1¹⁾に示すようなものがあるが、現状、実用化可能な技術はまだ少ない。実用化された技術のひとつが、炭酸塩などの鉱物として、CO₂を利用する技術である。この技術のひとつにCO₂と反応する混和材γ-C₂S（以下、特殊混和材）をコンクリートに混合し、さらに高濃度CO₂の環境下に置くことでカーボンリサイクルを実現する材料CO₂-SUICOM[®]（CO₂-Storage and Utilization for Infrastructure by CONcrete Materials）（以下、



図—1 カarbonリサイクル技術¹⁾

本環境配慮型コンクリート)があり、現在までに、建築部材などへ実適用²⁾を行ってきた。本環境配慮型コンクリートは、特殊混和材の使用と強制的な炭酸化により大量のCO₂をコンクリートに固定することを特徴としている。本報では、これらの特徴をもつコンクリートを「特殊混和材を用いたCO₂吸収コンクリート」と呼ぶ。特殊混和材を用いたCO₂吸収コンクリートは、副産物の使用など調合を工夫することで、材料製造時のCO₂排出量を実質0以下にするカーボンネガティブコンクリートとして適用できる。特にコンクリートはCO₂と反応するCaを豊富に含んでおり、建設時に使用する量も多いため、カーボンリサイクルの促進に有利な状況にある。そこで、特殊混和材を用いたCO₂吸収コンクリートによるカーボンネガティブコンクリートの現場打設、現場炭酸化養生の実現と、炭酸化させたコンクリートの躯体への適用をめざし東京都調布市にドーム建築物(短径18m×長径23mの楕円平面、高さ5.3m)を試行的に建設し(写真—1)^{3),4)}、それを踏まえて、2025年日本国際博覧会(以下、大阪・関西万博)の会場に同規模のドーム建築物を建設することとした⁵⁾。大阪・関西万博は、「人類共通の課題解決に向け、先端技術など世界の英知を集め、新たな

アイデアを創造・発信する場」をコンセプトのひとつに掲げており、大阪・関西万博のドーム建築物は、人類共通の課題であるCO₂排出量の削減に向けた新しい建設技術の実現にも資すると考えられる。

2. 開発の背景

近年、再生可能エネルギーが注目される中、バイオマス発電に使用する木質ペレット用のサイロとなるドーム建築物は、電力会社の原材料サイロとしての需要が高まることが期待される。この需要に応えるため、ドーム建築物を吹き付けコンクリートで構築する工法「KTドーム[®]工法(以下、吹き付けドーム工法)」を米国から技術輸入し、国内2件(神奈川県小田原市、山口県周南市⁶⁾)に導入した。

吹き付けドーム工法は、工場でポリ塩化ビニル(PVC)の膜をドーム型状に製作し、現場で基礎に固定し、大型の送風機で空気を送り込んで膨らませ(写真—2)、その内側に配筋を行い、コンクリートを吹き付け(写真—3)、躯体を構築する。施工は基本的にドーム内で行われるため、天候の影響を受けにくく、安全性の向上や、工期の変動の少ない短工期での施工が可能になるなどのメリットがある。吹き付け工法で使用するコンクリートは、製造時に多くのCO₂を排出するセメントを多量に使用することから、環境配慮型コ



写真—1 ドーム建築物 (TBK ドーム：東京都調布市)



写真—3 吹き付けコンクリートによる躯体の構築



写真—2 PVC膜の膨張状況



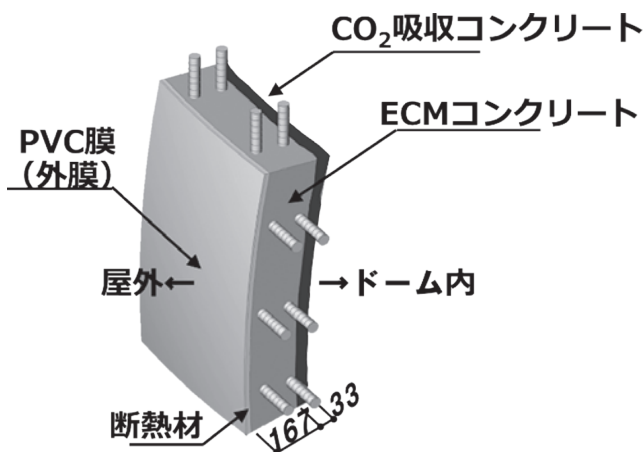


図-2 ドーム建築物の壁面構成

ンクリートを使用した施工方法を確立することが望ましい。ドーム建築物の壁面の構成を図-2に示す。今回のドーム建築物では、環境配慮型コンクリートを積極的に用いることを目指し、高炉セメントC種に相当するECM（Energy CO₂ Minimum）セメントを用いた本低炭素型コンクリートを吹き付け用に調整して躯体を構築した。加えて、ECMセメントと特殊混和材を用いて、吹き付け用の調合を検討し、カーボンネガティブの吹き付け用コンクリートによる吹き付け工法の開発を行った。

特殊混和材を用いたCO₂吸収コンクリートには、二つの課題がある。ひとつは現場での炭酸化養生を実施する方法であり、現場で高濃度のCO₂環境をいかに実現し、建築物などの大きな部材をどのように炭酸化させるかということと、もうひとつは鉄筋コンクリート構造（RC造）に必須な炭酸化させたコンクリート内での鉄筋の耐久性である。今までのCO₂吸収コンクリートは、比較的小さい部材を密閉空間で炭酸化させたブロックやプレキャスト部材などである。また、鉄筋の必要な部材はステンレス鉄筋などを用いた。これらは、プレキャスト部材として完成された技術であるが、コンクリートの使用量の大部分は、現場打ちコンクリートであることから、現場打ちCO₂吸収コンクリートによるカーボンリサイクル技術開発は、きわめて重要であり、今後のCO₂吸収コンクリートの適用範囲を大きく広げると考えられる。

上記の課題を解決するため、ドーム建築物の密閉性を活用し、ドーム内部にCO₂を充填して現場炭酸化養生を行い、特殊混和材を用いたCO₂吸収コンクリートを躯体の一部として用いる計画とした。今回、低炭素型コンクリート（本低炭素型コンクリート）の吹き付け、および特殊混和材を用いたCO₂吸収コンクリートの吹き付けから炭酸化養生を現場で行い検討を実施した。

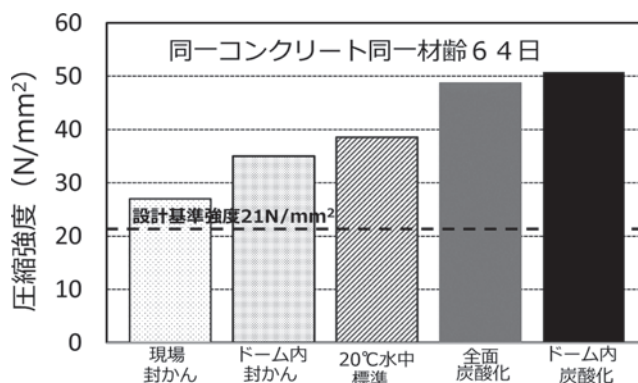
3. 吹き付けドーム工法とコンクリート

(1) 本低炭素型コンクリートによる吹き付けドーム工法

ECMセメントは、製鉄所からの副産物である高炉スラグを原料とした微粉末によりセメントの7割程度を置換した高炉セメントC種に相当する。このECMセメントを用いた本低炭素型コンクリートを今回、初めて、吹き付けドーム建築物に適用した。まず、膨らませたPVC膜の内側に断熱材などを施工し、配筋を行い、その上から本低炭素型コンクリートを40mm程度の厚みで層状に吹き付けていき、配筋と吹き付けを繰り返し、最内側に33mmのCO₂吸収コンクリートを吹き付けて、躯体を構築する。コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート（以下、普通コン）から二種類の環境配慮型コンクリートに変わったが、調布市飛田給のドーム建築物（TBKドーム）の施工の結果、吹き付けの作業性や施工後の仕上がりに大きな差はないことを確認した。また、ドーム内部の目視確認を行い、コンクリート表面に大きなひび割れがないことを確認した。以上により、二種類の環境配慮型コンクリートとも問題なく吹き付け施工できることを確認した。

(2) CO₂吸収コンクリートの躯体適用

今回、CO₂吸収コンクリートを躯体に使用するにあたり、設計基準強度としてFc21 N/mm²を設定した。特殊混和材を用いたCO₂吸収コンクリートの同一バッチの試験体について、養生方法を変えて圧縮強度試験を実施した結果を図-3に示す。試験は、全ての試験体の養生が終わった材齢64日に統一して実施した。最も強度の低い現場封かん養生でも21 N/mm²以上の強度が確認できた。また、高濃度（CO₂濃度80%）中性化促進試験機で全面炭酸化させた試験体とドーム内で炭酸化させた試験体は、圧縮強度が増進し

図-3 養生方法を変えたCO₂吸収コンクリートの圧縮試験結果

ていた。これらの結果から、必要な圧縮強度を確保できることを確認した。

また、全面炭酸化させたCO₂吸収コンクリートの試験体内部に鉄筋を配置して高温・高湿の促進環境に一定期間、存置することで、ドーム建築物の供用期間中に鉄筋に顕著な錆の発生がないことを確認、大阪・関西万博での建築確認済み証を取得した。今後は、長期耐久性の確認などを行いながらプレキャスト床板などに特殊混和材を用いたCO₂吸収コンクリートを展開していく予定である。

4. 炭酸化養生

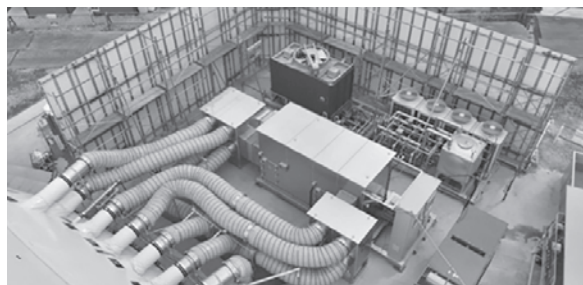
(1) 炭酸化養生装置

特殊混和材を用いたCO₂吸収コンクリートはCO₂と反応し緻密化、強度増進するので、吹き付け後にドームを密閉し、CO₂を充満させた状態で一定の養生期間を設ける。この養生期間中のドーム内の環境を整え炭酸化を促進する装置の開発を行った。写真—4にドーム用炭酸化養生装置の外観および図—4に概要を示す。本装置は空調機とCO₂供給装置、制御装置からなり、空調機でドーム内の高濃度のCO₂を循環させ、温・湿度とCO₂濃度を均一化する。CO₂供給装置は、コンクリートに吸収されるなどで減少するCO₂を随時補充する。CO₂の供給経路はドームに直接CO₂を供給する経路と空調機にCO₂を供給する経路があり、初期充填時には主にドームに直接CO₂を供給し、炭酸化養生時には、空調機にCO₂を供給することで濃度を維持する。

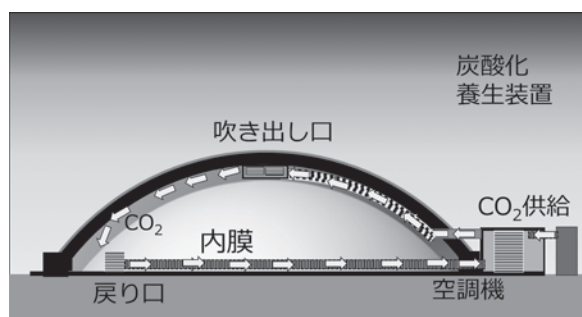
(2) 炭酸化養生

図—4に炭酸化養生装置の概要を示す。炭酸化養生中は、ドーム内部の高濃度CO₂を天井中央部に設置した吹き出し口より吹き出し、地上に設置した戻り口からダクトを通じて空調機に戻して、炭酸化養生を

実施する。写真—5にドーム内部の状況を示す。天井に設置された八角形状の吹き出し口から八方へ空気を吹き出す。また、図—5に炭酸化養生中の1日のドーム内の環境測定結果を示す。ドーム内の7か所に設置したセンサーにより計測したCO₂濃度は、7本のグラ



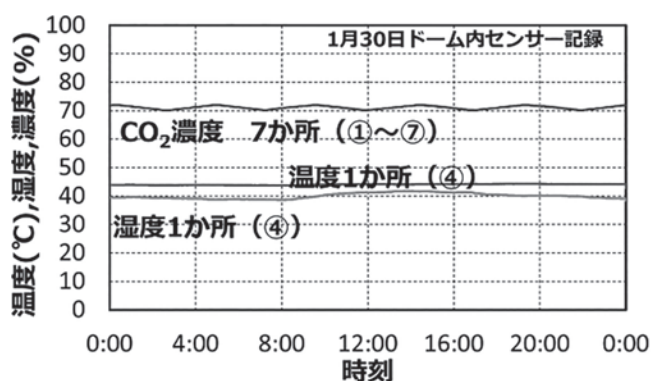
写真—4 炭酸化養生装置の外観



図—4 炭酸化養生装置の概要



写真—5 炭酸化養生直前のドーム建築物（TBK ドーム）内部



図—5 炭酸化養生中のドーム内部の平均的な1日の環境測定結果

フがほぼ一致しており、環境のバラツキが小さいことを確認できた。また、今回、炭酸化養生中の CO_2 濃度を 70% に維持できた。これは、ドームの気密性が高いために可能になったと考えられる。

(3) 内膜

球は最小表面積で最大体積をもつ立体のため、半球に近似するドーム形状は内部の体積が大きく、充填に必要な CO_2 量が過大になる。そこで、ドーム建築物での炭酸化養生にあたっては、ドーム建築物内部に躯体より、300~1,000 mm 程度小型のドーム形状の PVC 膜（図—4 に示す内膜）を空気膨らませ（写真—6）、ドーム本体と内膜との隙間に CO_2 を充填することで CO_2 の使用量を減らす方法を採用した。本工法の採用により、 CO_2 の充填量を 50% 以上減らすことができる。炭酸化養生時、内膜はバルブを閉じて、内部に空気を保持する風船状とし、適宜空気を補充することで炭酸化養生期間中の 28 日間形状を保持した。

5. CO_2 削減効果と今後の展開

今回、躯体に本低炭素型コンクリートと特殊混和材を用いた CO_2 吸収コンクリートを用いたことで、既往の普通コンの吹き付けドームと比較し、材料由来の CO_2 排出量を 70% 削減できた（図—6）。今後は、大阪・関西万博（会期 2025 年 4 月 13 日～10 月 13 日）会場に、本ドーム建築物の手法でカーボンネガティブドーム（図—7）の建設を進める。

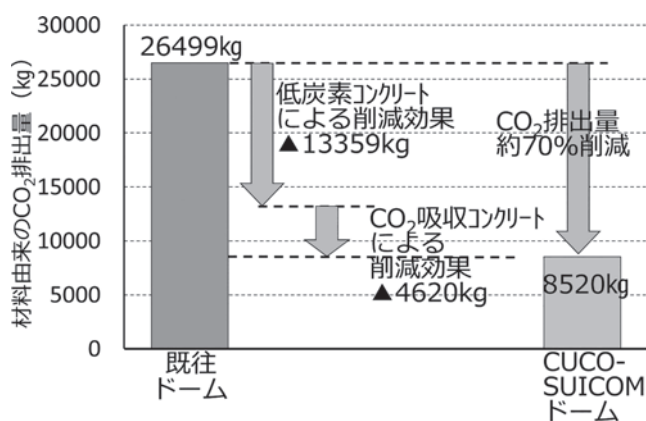
加えて、特殊混和材を用いた CO_2 吸収コンクリートの技術をベースとした上で、材料にカーボンリサイクル技術を用いた CCU（Carbon Capture and Utilization）材料、および廃棄太陽電池パネルのリサイクル品ガラスカレットを用いたインターロッキングブロックをドーム建築物周辺など会場内に敷設する。

ECM セメントを用いた低炭素型コンクリートの吹き付け施工の可能性を確認したことで、吹き付け本低炭素型コンクリートをパリエーションに加えることができた。

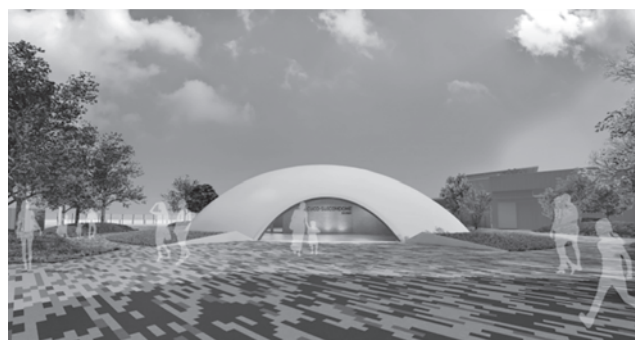
CO_2 吸収コンクリートに関しては、まだ、開発段階であるが、現場炭酸化養生が可能であることが確認できた。今後、本技術開発の成果を活用し、再生エネルギーの活用やコストダウン手法の検討、プレキャスト建築構造部材やトンネルなどへの適用検討など CO_2 吸収コンクリートの新しい技術開発を進めていく。



写真—6 ドーム建築物内部



図—6 ドーム全体の CO_2 削減量算定結果



図—7 カーボンネガティブドーム外観と外構のブロック
（イメージ大阪・関西万博）

謝 辞

本成果は、NEDO（（国研）新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務（JPNP21023）を受け、革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術および評価技術の開発プロジェクトで得られた成果である。

《参考文献》

- 1) 経済産業省, 「カーボンサイクルロードマップ」一部抜粋, pp.7, 令和5年6月23日
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_recycle_rm/pdf/20230623_01.pdf
- 2) 巴史郎/笠井浩, CO₂吸収コンクリートを用いたプレキャスト埋設型枠の建築物への使用, 日本建築学会学術講演梗概集 2022, pp.595~596, 2022/7
- 3) 巴史郎ほか, 低炭素コンクリートおよびCO₂吸収コンクリートによるドーム建築物の開発, 日本建築学会学術講演梗概集 2024, pp.503~504, 2024/7
- 4) 鹿島建設, CO₂排出量を70%削減した「CUCO®-SUICOM ドーム」の試験施工を完了
～大阪・関西万博に向けて環境配慮型コンクリートドームを構築～, 鹿島建設プレスリリース, 2024/3/13
<https://www.kajima.co.jp/news/press/2024/03/13a2-j.htm>
- 5) 鹿島建設, 「KTドーム®」工法を実工事に適用 ドーム型構造により柱や梁のない大空間を実現, 鹿島建設プレスリリース, 2021/12/23
<https://www.kajima.co.jp/news/press/202112/23a1-j.htm>
- 6) 鹿島建設, 大阪・関西万博にブロンズパートナーとして環境配慮型コンクリートドーム「CUCO®-SUICOM ドーム」を建設, 鹿島建設プレスリリース, 2024/3/13
<https://www.kajima.co.jp/news/press/202403/13a1-j.htm>

〔筆者紹介〕

巴 史郎 (ともえ しろう)
鹿島建設㈱
技術研究所 建築生産グループ
GI 基金 CN コンクリートプロジェクトチーム
上席研究員

