

炭素繊維シートの主排気筒ダクトの補修への適用

Adaptation of the main duct maintenance technology used by Carbon Fiber Reinforce Polymer (CFRP)

日本原子力機構	綿 引 健 二	Kenji WATAHIKI	(Non Member)
日本原子力機構	川 澄 裕 之	Hiroyuki KAWASUMI	(Non Member)
日本原子力機構	八戸木 日出夫	Hideo YATOJI	(Non Member)
日本原子力機構	伊 波 慎 一	Shinichi INAMI	(Member)

Off-gas of Tokai Reprocessing Plant, including gaseous radio-active elements, has been emitted from main stack after through exhaust duct. There were corrosion and crack at the part of the iron exhaust duct near the main stack. Repairing method was planned to be used iron plate covering the corroded and cracked area, which would be attached and welded. To take into considering of reducing the weight of the attachment, much lighter materials namely carbon fiber reinforce polymer, CFRP, was applied except for the iron plate. Necessary numbers of layers of CFRP to be enough strength and inner pressure was calculated for designing. In order to achieve satisfying essential specification with workmanship, training for the workers was carried out using mock-up before the actual one. In this paper, we report the CFRP method is the efficient and effective method repairing corrosion and crack at the iron duct, in Tokai Reprocessing Plant.

Keywords: maintenance, CFRP(Carbon Fiber Reinforce Polymer), layer, resin, epoxy, repair

1. 緒言

東海再処理工場は、原子炉で使用された使用済み核燃料をせん断、溶解及び精製する分離精製工場や高放射廃液を貯蔵するための施設等からなる核燃料再処理工場である。東海再処理工場内の各施設は、内包する放射性物質を施設内に閉じ込めるため、換気設備を利用して施設内を負圧に維持し、排出される排気は、各施設でろ過後、ダクトにより分離精製工場へ導かれ、当該工場からのダクトと接続した主排気筒から大気中に放出している。

このダクトのうち、主排気筒に接続する屋外の高所に設置した鋼板製ダクト（以下、「主排気筒ダクト」という。）の溶接部等に腐食による貫通や割れが確認された。これら貫通及び割れの補修を行うにあたり、各施設からの排気を停止することなく、また、既設の鋼板製ダクトに負担をかけない方法として炭素繊維シートを用いた工法によりダクトの補修を行った。

炭素繊維シートによる補修は、ダクトの強度及び内圧から炭素繊維シートの繊維方向及び必要な積層数を設計するとともに、施工に際しては、強風下にあるダクト内での施工を考慮したモックアップを行うことにより、施工品質を担保した。

これらにより、主排気筒ダクトは必要な強度を保持するとともに、既設ダクトに負担をかけることなく短期間に補修を行うことができ、炭素繊維シートによる補修方法が、効率的かつ効果的であることを確認した。

2. 主排気筒ダクトの概要

貫通及び割れ等を生じた主排気筒ダクトの構造、ダクト内を流れる排気の状態を以下に示す。

2.1 ダクトの構造

主排気筒ダクトは、全長約 16m、厚さ約 4.5mm の炭素鋼 (SS400) 製であり、ダクト両端にはダクトの変位を吸収するステンレス製 (SUS304/316) の伸縮ベローズを設置している。ダクトの形状は、中央部が円形 (φ約 3.2m)、両端部は矩形 (約 3m×約 2.5m) をしており、ダクト内外面には樹脂系塗装を施している。また、ダクト本体は、鋼製トラスにより支持されており、鋼製トラスは、地上約 15.8m の高さの鋼製の架構により、トラス底部から支持する構造となっている。

(Phot.1, Fig.1 参照)

2.2 ダクト内排気

分離精製工場等から発生する気体廃棄物は、放射性物質を各施設内のフィルタ等でろ過、除去した後、主排気筒ダクトを経由し、約 90m の高さの主排気筒の先端部から排出される。

ダクト内を流れる排気風量は、施設の運転状況によ

連絡先:綿引健二、〒319-1194 茨城県那珂郡東海村
村松 4-33、核燃料サイクル工学研究所 再処理技術開発センター 施設管理部 施設保全第 1 課、
電話 029-282-1111、E-mail:watahiki.kenji@jaea.go.jp

り異なり、一部の排風機を停止した制限運転において約 300,000m³/h であり、ダクト内風速は約 15m/s であるのに対し、通常の運転状態では排気風量約 400,000 m³/h、ダクト内風速は約 21m/s であり、ダクト内の風速分布に偏りがある。特に主排気筒との接続部となる矩形ダクト内は、風の流が複雑な状態にある。このため、主排気筒ダクトの補修にあたっては、風による補修作業への影響や作業員の安全に配慮し、換気設備の運転を制限運転の状態とした。(Fig.2 参照)



Phot.1 Main ducts

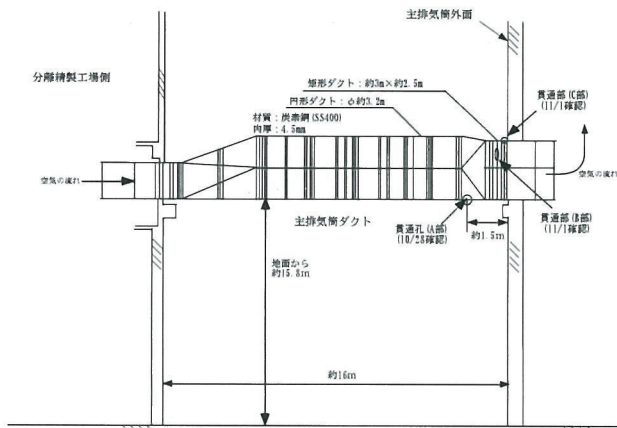


Fig.1 Structure of the Main Stack duct

3. ダクトに生じた貫通、割れ等の状況

3.1 貫通、割れ等の状況

主排気筒ダクトは、設置後約 40 年が経過し、この間 10 年程度毎に再塗装などのメンテナンスを行ってきた。平成 23 年 10 月、主排気筒ダクトの補修作業を

行っていたところ、主排気筒側の異形ダクトの下部に腐食が見つかり、腐食部位を点検した結果、当該腐食部位は、貫通していることを確認した。このため、ダクト全体を全周にわたり腐食や貫通の有無について調査したところ、主排気筒側の矩形ダクトの溶接部の一部にも腐食による貫通や割れ等が生じていることを確認した。また、腐食による減肉の状態を確認するため、ダクト全体に渡り超音波による肉厚測定を行った結果、主排気筒側の矩形ダクト以外には顕著な肉厚の減少は確認されなかった。(Fig.3 参照)

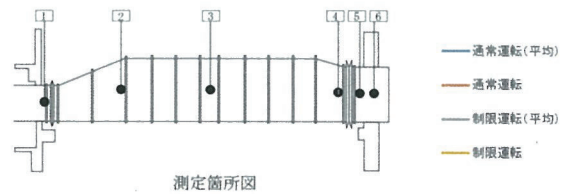
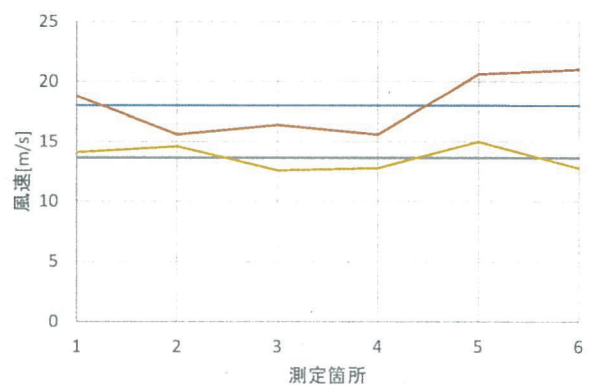


Fig.2 Flow velocity distribution in the main stack ducts

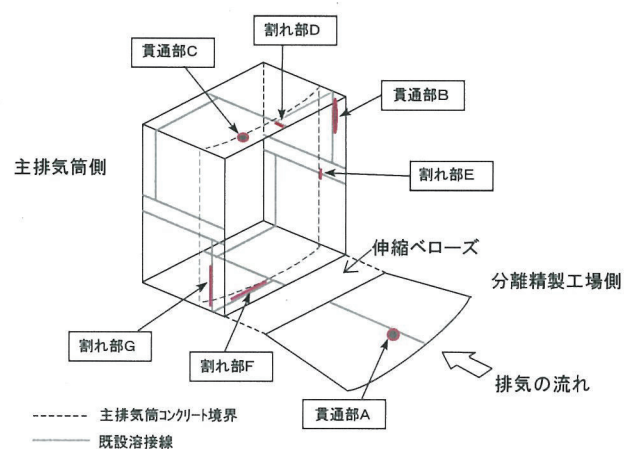
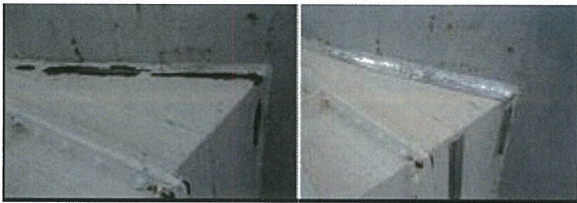


Fig.3 Overview of corrosion and crack at the main stack ducts

3.2 応急措置

腐食が確認された箇所については、貫通の有無を調査・点検し、貫通の確認された箇所は、応急措置としてアルミテープ等で排気が漏れないように処置した。また、貫通していない減肉箇所についても腐食の進行や貫通孔等の発生を考慮してアルミテープ等による保護を行った。(Fig.4 参照)

なお、アルミテープ等による応急措置は、風雨等により剥離する可能性があることから、養生シートにより保護するとともに、措置の状況を日々点検することとした。



<応急措置前>

<応急措置後>

Fig.4 Situation of the emergency countermeasure

4. 補修方法の検討と実施

主排気筒ダクトに生じた腐食による貫通、割れ及び減肉部の補修を行い、機能を回復させた主排気筒ダクトによる放射性物質の放出経路を維持する必要がある。このため、以下の事項を考慮した補修方法を選定することとした。

- 耐圧性能の回復
- 貫通部の断面性能の回復
- 減少したダクトの板厚の回復
- 既設ダクトと同様の信頼性の確保
- 排気を停止しない

その結果、主排気筒ダクトの補修に求められる上記事項を満足する補修方法として以下の4つの方法について検討した。

- ①ダクトの更新
- ②対象ダクトの二重管化
- ③鋼板による当て板補修
- ④強化樹脂による補修

4.1 各補修方法の比較評価

絞り込んだ補修方法について工期、コスト、実現性について検討し、短工期であって、既設と同程度の信頼性が確保でき、かつ低コストで補修が可能な鋼板による当て板補修及び強化樹脂による補修について更に検討を行った。(Table.1 参照)

当て板による補修については、異種金属間腐食や溶接性の観点から、既設ダクトと同材質であるSS400鋼板を用い、溶接施工により取り付け一般的な補修方法である。一方、補修対象である矩形ダクトは、施工後40年近くが経過した溶接組み立てダクトであり、一部の溶接部に腐食による貫通や割れが認められ、経年劣化した状態にある可能性がある。このため、補修時の溶接による熱応力によって新たな割れが発生するリスクがあった。

このリスクを回避する方法として、強化樹脂による補修を検討した。強化樹脂による方法は、炭素繊維やガラス繊維にエポキシ等の樹脂を含浸させて母材に接着する方法であり、既設ダクトに熱を加えることなく補修でき、このうち炭素繊維を用いた強化樹脂は、機械的強度に優れることから、本補修に適用可能と考えられる。しかし、炭素繊維強化樹脂(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Polymer)¹⁾は、原子力施設における補修、補強への利用実績が少ない。このため、補修する上で必要となる接着強度や耐候性等の信頼性について調査・検討した。CFRPの使用実績のある建設関連の技術文献等を調査した結果、CFRPは高い信頼性があり、施工方法も確立されていることが分かったことから、主排気筒ダクトの補修には、CFRPを適用することとした。

Table.1 Comparison of methods for repairing iron duct

項目	ダクト更新	対象ダクトの二重化	当て板補修	樹脂補修
工期	×	△	○	○
コスト	×	△	○	○
実現性	○	△※1	△※1	△※2

※1: 高経年化した溶接ダクトへの溶接補修を行うリスク

※2: 原子力産業界における設備補修への適応実績

4.2 炭素繊維強化樹脂のダクト補修への適用

4.2.1 炭素繊維シートの特徴

炭素繊維シートは、直径7~10μmの繊維で3,000

～24,000 本程度収束させた繊維の束を並べたシートであり、この炭素繊維シートに接着樹脂を含浸させ完全硬化させたものを炭素繊維強化樹脂 (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Polymer) という。この CFRP は、日本工業規格 (JIS) において、各種試験方法が規格化され、架橋や建物などの耐震補強、自動車の車体及び航空機の機体等の多くの分野で使用されている。また、CFRP は、メーカ、大学及び研究機関において各種試験^{1)～7)}が行われており、CFRP は、炭素鋼 (SS400 等) に比べ引張強度が非常に高く、耐食性、耐候性等を有しており、250 万回に及ぶ疲労試験でも剥がれは発生せず、ダクトの振動やダクト内の風の流れの影響を受けても剥がれ難いことが文献から確認できた。

CFRP の物性は、炭素繊維シートの目付量 (200～600g/m²) や含浸樹脂の特性等により異なるが、主な特徴は以下の通りである⁸⁾。

- CFRP は、炭素繊維と接着樹脂から構成され、その密度は約 1.8g/cm³ と鉄の 1/5 程度であり、CFRP の厚さは約 0.6～1.5mm であることから、貼り付けによる重量の増加は非常に小さい (軽量)。
- 高強度型 CFRP の引張強度は、2,000N/mm² 以上であり、鋼材の約 5 倍以上である (高強度)。
- 高弾性型 CFRP のヤング率は、約 440kN/mm² であり、鋼材の約 2 倍以上である (高弾性)。
- CFRP は、炭素繊維と接着樹脂から構成されていることから、環境中において腐食・劣化に対して安定である (高耐久性、気密性)。

これらの調査結果を踏まえ、炭素繊維シートによる補修には高い信頼性があると同時に、炭素繊維シートは補修箇所にあわせてシートを裁断し、エポキシ樹脂で直接接着することで補修が行えることから、自由度の高い補修方法であり、主排気筒ダクトの補修に適用することが可能と判断した。実機への適用の確認のため、補修に合わせて炭素繊維シートを接着した試験片による引張強度試験を実施し、複合材の強度について確認を行った。

4.2.2 補強鋼板 (複合材) の引張強度試験

主排気筒ダクトの炭素繊維シートによる補修について、SS400 の試験片に炭素繊維シートを接着した模擬試験片を用いた引張強度試験を実施した。

模擬試験体の主要な仕様を以下に示す。なお、試験片には割れを模擬したのもも準備した。

- ① 試験片: 板厚 2.3mm の SS400 材 (Fig.5 参照)
- ② 炭素繊維シート: FTS-C8-30 (高弾性型、目付量 300g/m²、引張強度: 1,900N/mm² 以上) (新日鉄住金マテリアル製)
- ③ 含浸接着樹脂: FR-E9P (接着強度: 1.5N/mm² 以上) (新日鉄住金マテリアル製)

本試験において準備した試験片及び試験方法は、以下のとおりである。なお、欠陥部は、エポキシ樹脂による補修を行った後、炭素繊維シートを接着した。

(1) 試験片

- ① 試験片 A (無欠陥+無補強)
- ② 試験片 B (無欠陥+1 層)
- ③ 試験片 C (無欠陥+5 層)
- ④ 試験片 D (欠陥+1 層 (定着長: 20mm))
- ⑤ 試験片 E (欠陥+1 層 (定着長: 50mm))
- ⑥ 試験片 F (欠陥+5 層)

(2) 試験方法

- ① 試験温度: 約 20℃
- ② 試験速度: 15mm/min 一定
- ③ 測定項目: 試験体破断時の引張強度
- ④ 引張応力: 無補強の試験体断面により計算
- ⑤ 試験機器: オートグラフ引張試験機 AG-100KNE (島津製作所製)

本試験の結果について、試験片 A の試験結果を Fig.6、試験片 B 及び C の結果を Fig.7 並びに試験片 D、E 及び F の結果を Fig.8 に示す。

本試験結果から、炭素繊維シートを接着した試験片は、母材の欠陥の有無に関らず降伏点が大幅に向上し、炭素繊維シートの接着が 1 層の試験片に比べ、5 層積層させた試験片の方が、降伏点も大きくなることが確認された (Fig.7, Fig.8 参照)。これは母材に対して接着した炭素繊維シートが相当量の荷重を負担しているため、複合材としての機械的性能が向上したものと考えられ、炭素繊維シートに発生する応力は①式⁹⁾から求められる (Table.3 参照)。また、CFRP の定着長の違いによる強度への影響について確認した結果、定着長が 20mm 以上の場合、CFRP の補強効果に影響を与えないことが確認された (Fig.8 参照)。

$$\sigma_{cf} = \frac{E_{cf} \times P}{E_s \times (A_s + \frac{E_{cf}}{E_s} \times t_{cf} \times n \times B_{cf})} \quad \text{①式}$$

E_s : 鋼材のヤング率 [kN/mm²]
 E_{cf} : 炭素繊維シートのヤング率 [kN/mm²]
 t_{cf} : 炭素繊維シートの鋼材換算厚さ [mm]
 t_{cf} : 炭素繊維シート1枚あたりの厚さ [mm]
 n : 炭素繊維シートの積層数
 B_{cf} : 炭素繊維シートの幅 [mm]
 A_s : 鋼材の断面積 [mm²]
 A_{cf} : 炭素繊維シートの鋼材換算断面積 [mm²]

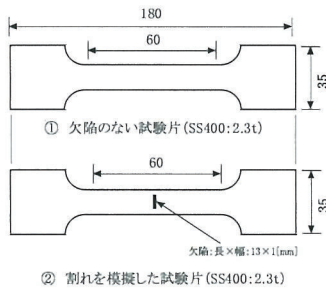


Fig. 5 Overview of test pieces for strength tensile test

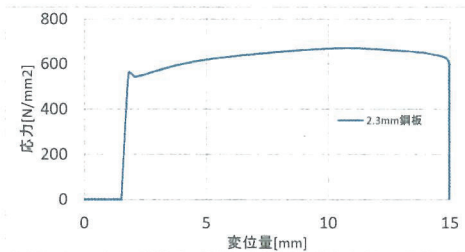


Fig. 6 Result of strength tensile test using test piece

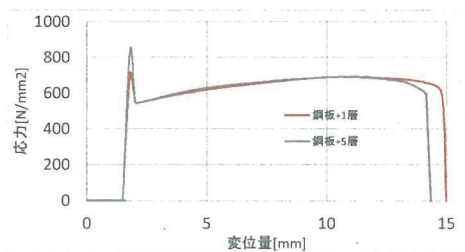


Fig. 7 Result of strength tensile test using test pieces reinforced with CFRP

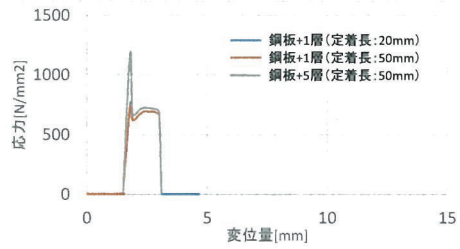


Fig. 8 Result of strength tensile test using defective test pieces reinforced with CFRP

Table.3 Generated stress of each material

項目	荷重 [N]	鋼板			CFRP			
		断面積 [mm ²]	ヤング率 [N/mm ²]	応力 [N/mm ²]	断面積 [mm ²]	ヤング率 [N/mm ²]	応力 [N/mm ²]	
鋼板+1層	欠陥無	40293	57.75	201000	574.6	3.575	696000	1989.5
	欠陥有	20314	27.86	201000	504.8	3.575	696000	1748.1
鋼板+5層	欠陥無	48233	57.75	201000	403.1	17.875	696000	1395.9
	欠陥有	32800	27.86	201000	365.4	17.875	696000	1265.4

4. 3 耐圧性の確保に必要な積層数

主排気筒ダクトの補修箇所は、矩形ダクトに集中していることから、当該ダクトの耐圧性について、平板における大たわみ理論による等分布荷重、4辺単純支持の長方形板として②、③式により発生応力を求め、炭素繊維シートの許容応力と比較して評価した。本評価にあたっては、JIS A4009「空気調和及び換気設備用ダクトの鋼製部材」におけるダクト内圧とダクト壁面の大きさによる最低板厚 1.2mm を耐圧性の確保に必要な板厚とし、炭素繊維シートの厚みはカタログより 0.14mm/1層とした。

$$\frac{256(1-\nu^2)P}{\pi^6 E h^4} = \frac{4}{3} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \frac{w_{\max}}{h} + \left\{ \frac{4\nu}{a^2 b^2} + (3-\nu^2) \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) \right\} \left(\frac{w_{\max}}{h} \right)^3 \quad \text{②式}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{\pi^2 E w_{\max}}{8(1-\nu^2)} \left(\frac{(2-\nu^2)w_{\max} + 4h}{a^2} + \nu \frac{(w_{\max} + 4h)}{b^2} \right) \quad \text{③式}$$

- P : 内圧、ダクト部材及び炭素繊維シート等の補修材による等分布荷重 [Pa]
- π : 円周率
- E : 縦弾性係数 [MPa]
- ν : ポアソン比
- a, b : 補強フランジ間隔及びダクト長径 [m]
- h : ダクトの板厚 [m]
- w_{\max} : 最大たわみ [m]
- σ_{\max} : 最大発生応力 [MPa]

評価の結果、ダクト底面のたわみ量から求めた炭素繊維シートに生じる最大引張応力と許容応力との比は0.04であり、炭素繊維シート1層で十分な耐圧性が確保されることが分かった。

4.4 耐震性の確保に必要な板厚

主排気筒ダクトの地震による影響評価は、各々独立した分離精製工場と主排気筒の相対変位により行うことができる。相対変位が生じた際の主排気筒ダクト及び鋼製トラスに生じる応力は、FEM解析によって求められ、本評価に用いる地震力で応答倍することにより、主排気筒ダクトに生じる発生応力を算出した。この結果、ダクト材の許容応力との比が「1」となる板厚は約1.6mmであり、耐震性の確保に必要な板厚は、裕度を加味し2mmとした。

4.5 炭素繊維シートによる補修設計

- (1) 炭素繊維シートを用いた補修は、炭素繊維シートの選定、繊維方向、積層数及び接着範囲について設計する必要がある。炭素繊維シートには多くの種類があり、目的や用途に合わせて選定する。本件で補修する異形及び矩形ダクトは、貫通部や減肉部等の断面欠損による部分的なダクト強度の低下が生じていることから、高弾性型炭素繊維シートを用いて補修することによって、合理的に低下した強度を補うことができる。また、炭素繊維シートを接着する繊維方向については、荷重によって曲げモーメントの生じるダクト軸方向に炭素繊維を配置する。なお、貫通部及び割れ部については、ダクト軸方向に直交する周方向にも炭素繊維シートを接着することで、耐圧性能を確保する。
- (2) 次に、補修箇所において回復させたい強度に応じた炭素繊維シートの積層数は、回復させたい鋼板厚さに相当する鋼板の剛性に対し、等価な炭素繊維シートの剛性を④式、⑤式により算出することで、積層数が求められる⁹⁾。したがって、主排気筒ダクトの貫通部及び割れ部において回復させたい鋼板厚さは2mm相当であることから、炭素繊維シートを5層積層させることとした (Table.4 参照)。また、減肉部については鋼板厚さ2mm相当とするため、炭素繊維シートを3層積層させることとした。

- (3) 最後に、選定した炭素繊維シートについて接着範囲を設計する。接着範囲とは、補修範囲に対し最小貼付長さを加味した範囲である。接着範囲は、補修範囲に炭素繊維シートの繊維方向に対して両端に定着長(20mm以上)を加えるとともに、炭素繊維シートを積層する場合は、積層毎に端部への応力集中による剥がれを防止するために、両端部を20mmずつ離れた長さを加える。また、シート幅方向は補修幅に一定長さ(10mm以上)を加味する。

炭素繊維シートを繊維方向で接続する場合は、繊維方向に100mm重ね、シート幅方向に貼付ける場合は、シート同士の突き合わせ又は10mm程度を重ねて施工する^{8), 9)}。したがって、接着範囲の設定には補修範囲の大きさの他に積層数、定着長、重ね代等を十分に加味する必要がある。

以上の補修設計から、主排気筒ダクトの補修においては、さらに主排気筒側の異形及び矩形ダクトの既設溶接部の経年劣化対策として、異形ダクト内の底面及び矩形ダクトの全内面に、炭素繊維シートによる割れ防止を施すとともに、矩形ダクトのうち主排気筒外部となる全外面には、腐食の進行を抑制するための炭素繊維シートを貼り付けることとした。(Fig.9 参照)

$$t_{cfs} = \frac{E_{cf}}{E_s} \times t_{cf} \times n \quad \text{④式}$$

$$t_{cfs} \times B_{cf} = A_{cfs} \geq A_{sl} \quad \text{⑤式}$$

- E_s : 鋼材のヤング率 [kN/mm²]
- E_{cf} : 炭素繊維シートのヤング率 [kN/mm²]
- t_{cfs} : 炭素繊維シートの鋼材換算厚さ[mm]
- t_{cf} : 炭素繊維シート1枚あたりの厚さ [mm]
- n : 炭素繊維シートの積層数
- B_{cf} : 炭素繊維シートの幅 [mm]
- A_{sl} : 鋼材の欠損断面積 [mm²]
- A_{cfs} : 炭素繊維シートの鋼材換算断面積 [mm²]

4.6 炭素繊維シートによる補修

炭素繊維シートによる補修については、以下の手順により実施した。また、補修においてはダクト内風速が炭素繊維シートの接着作業に大きく影響することから、低減するため、換気設備の送排風機の一部

を停止した制限運転として風速の低減を図るとともに、制限運転においても主排気筒ダクト内の風速が約 15m/s 程度となることから、同程度の環境を再現したモックアップ訓練等を行うことで、施工品質を担保した。なお、矩形ダクト外面については、CFRPの保護用にアラミド繊維強化樹脂を1層接着し塗装で仕上げた。以下に主排気筒ダクトの補修に係る手順を示す。

Table.4 Calculation result of numbers of CFRP layers equivalent to 2 mm thickness iron plate

補修断面積: A_{al}	CFRP断面積: A_{cf}	Feヤング率: E_s	CFヤング率: E_{cf}
[mm ²]	[mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
2500	2846	201000	640000
CF厚/枚: t_{cf}	CFシート幅: B_{cf}	積層数: n	CF換算厚: t_{cfs}
[mm]	[mm]	[n]	[mm]
0.143	1250	5	2.277
鋼板厚み	鋼板減肉		
[mm]	[mm]		
4.5	2		

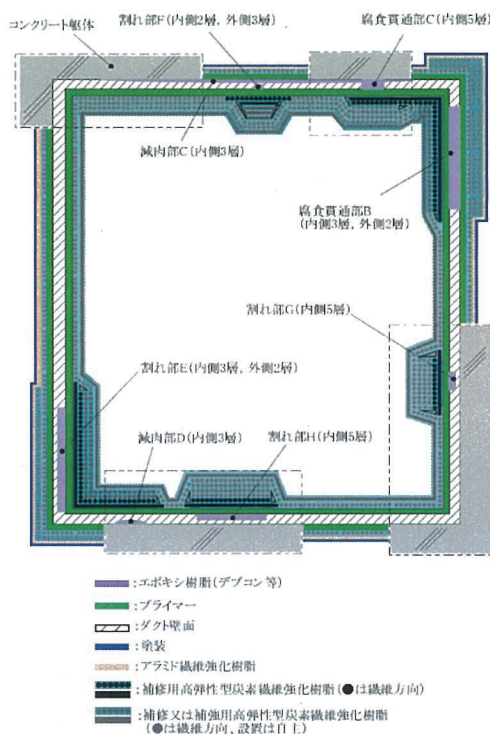


Fig.9 Section view of repairing rectangular duct using CFRP

- (1) 炭素繊維シートの含浸接着に係る下地処理
 - 主排気筒側矩形ダクトの内面の塗装を2種ケレンにより剥離し、金属光沢面を出す。
 - 主排気筒側矩形ダクトの主排気筒外側部分の外面の塗装を内面と同様に剥離する。
 - 主排気筒側異形ダクト内面の補修箇所の塗装を剥離
 - 塗装剥離箇所に鋼材用プライマーを塗布
- (2) 炭素繊維シートの含浸接着
 - 矩形及び異形ダクトの補修箇所に、含浸接着樹脂を塗布し、炭素繊維シートをダクト軸方向に貼り付ける。
 - 貫通部及び割れ部は、炭素繊維シートをダクト軸方向及び周方向に1層ずつ貼り付けた後、4層を追加、減肉部は3層積層させる。
 - 矩形ダクト内面は補修後、全内面に炭素繊維シートを軸方向及び周方向に接着する。
 - 矩形ダクト外面(主排気筒の外部となる部分)においては、炭素繊維シートをダクト軸方向に貼り付ける(1層接着)。

5. まとめ

主排気筒ダクトの異形及び矩形ダクトに生じた腐食による貫通及び割れ部等の補修について、炭素繊維シートを用いることで、比較的容易に補修することができた。また、矩形ダクトの劣化が進行した既設溶接部の補強についても同時に行うことができ、これらの施工に要した期間は、約46日間であり、補修のみを行った場合、各層で実施した検査を含めて約30日間で完了させることができたと考えられる。一般的な補修方法である当て板補修においては、施工メーカの見積もりにより補修作業に約46日間が必要であることに比べ、CFRPによる補修は効率的かつ効果的であることが確認できた。

今回のCFRPを用いた補修技術により、鋼製構築物の補修に十分適用できると考える。

6. 参考文献

- 1) 第6回 複合構造の活用に関するシンポジウム「炭素繊維シート(CFRP)を用いた鋼部材部分補修に関する実験研究」 杉浦、他より

- 2) 土木学会第 55 回年次学術講演会「炭素繊維シートが鋼板疲労亀裂の伝播を抑制する効果」
- 3) 炭素繊維複合材料の耐候性試験結果 (財)日本ウェザリングテストセンター
- 4) 広島工業大学紀要研究編第 41 卷 (2007) 炭素繊維プレートによる鋼構造建築建物の接着補強工法に関する基礎的研究
- 5) 腐食減厚した鋼部材の性能回復評価に関する研究 島袋 秀也
- 6) 土木学会論文集 A Vol.64 鋼部腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究 杉浦、他
- 7) 断面欠損を有する軸力部材の CFRP ストランドシートによる接着補修 長岡技術科学大学 大谷、他
- 8) 東レ株式会社「トレカクロス工法技術資料」2011 年 5 月
- 9) 炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法設計・施工マニュアル (株)高速道路総合技術研究所