

はじめに

国際海上固体ばら積み貨物規則（IMSBC コード、以下「コード」）には、さまざまな形態の直接還元鉄（DRI）が記載されています。2025 年 1 月から強制的にコードの一部となる最新の追加項目は、水分含有量が少なくとも 2%のタイプ D、微粒副生物に関するものです。この項目は複数ページにわたり、大量の重要な情報とガイダンスが含まれています。本回報では、タイプ D 項目の主要なポイントを要約し、必要に応じて追加のガイダンスと観察上の注意が加えられています。

本回報は、国際 P&I グループ（IG）が Dr J H Burgoyne & Partners LLP（Burgoyne）と協力し、INTERCARGO からの意見を取り入れて作成されました。Burgoyne による解説は、本回報の本文中に青字で記載されています。

本回報はガイダンスのみを目的としており、本回報に添付されている IMSBC コードの関連項目が、依拠すべき輸送要件の主要な情報源であることにご留意願います。

背景

直接還元鉄（DRI）は、通常、塊またはペレット状の鉄鉱石に水素、メタン、一酸化炭素などの熱還元ガスを通過させることによって生成されます。これにより、再酸化のために非常に大きな内部表面積を持つ多孔質の鉄材料が生成されます。DRI に関連する主な危険性は、酸化による自己発熱能力と、水/水分との反応による水素生成能力です。船倉内に積み込まれた場合、水との反応によって生成された水素は、船倉内に爆発性雰囲気を作り出し、爆発の危険性をもたらします。

DRI の主な形態はタイプ A（熱間成形ブリケット）とタイプ B（ペレット）ですが、製造および取り扱い中（摩耗による）、およびオフ・ガスから粒子をろ過することによっても微粉が生成されます。微粉は一般的にタイプ A および B との混合には適さないため、ふるいにかけられ、個別に取り扱われます。

以前は、微粉は DRI タイプ C として輸送されていましたが、このタイプの IMSBC コードでは、貨物の水分値を 0.3%以下と定義しています。屋外保管や雨の中での取り扱いなど、微粉の取り扱い慣行上、このような低い水分レベルは実現可能でないことがよくあります。

さらに、コードは DRI（C）貨物を DRI（B）と同様に不活性ガス下で輸送することを求めています。不活性ガスは空気（酸素）を排除し、酸素との反応による自己発熱を制限することを目的としています。ただし、後述するように、自己発熱は通常、微粉の主な問題ではありません。代わりに、一般的なリスクは水との反応による可燃性水素ガスの発生であり、爆発下限界プラス安全マージン以下の低水素濃度を維持するために船倉を換気する必要があるというシナリオにつながります。

水分含有量が 0.3%以下の DRI（C）微粉の生産が困難であるため、IG クラブの経験では、荷送人は IMSBC コードのセクション 1.5 に従った免除の下で、そのような貨物を輸送しようとするのがよくありました。これらの免除は、不活性ガス下での輸送を避け、代替手段として機械換気を使用しようとするのが多かったのですが、三者間合意が必要なため、困難がありました。したがって、業界が協力して、より永続的で安全な長期的な解決策を模索する必要がありました。

そのために、コードの改正 07-23 では、4 番目の DRI スケジュール、直接還元鉄（D）（含水率 2%以上の微粒副生物）が導入されました。

DRI (D) は、DRI (C) と同様に、DRI (A) および DRI (B) の製造および取り扱いプロセスの副生物として説明されていますが、水分含有量が高くなっています (DRI (C) の $\leq 0.3\%$ と比較して $\geq 2\%$)。

新しい DRI (D) スケジュールでは、運送許容水分値 (TML) を超える水分含有量で輸送された場合の液状化のリスクについても言及されています。したがって、DRI (D) はグループ A 貨物とグループ B 貨物の両方に分類されます。

DRI (D) に関連する主な危険性は、比較的高い水分含有量と水との反応による水素生成です。対照的に、微粉が密に充填されているため、多くの場合、ばら積状態の貨物への酸素/空気の侵入が減少し、その結果、大気酸化反応による自己発熱の傾向が低下し、多くの場合、問題のないレベルになります。そのため、DRI (B) および DRI (C) にはそのような要件があるのに対し、DRI (D) スケジュールでは、爆発性雰囲気形成を防ぐための船倉の不活性ガスによるパージや、酸素侵入を排除するための船倉の密閉の維持に関する要件はありません。代わりに、水素濃度を船倉内で指定された制限未満に維持するために、制御された機械表面換気と定期的なガス濃度測定を導入する必要があります。

IG は、死者を含む多数の事故が発生したため、以前に DRI 貨物に関する回報を発行しています。これらの勧告は 20 年近く前に発行されたものですが、それら事故の深刻さと水素を放出する可能性のある貨物を考慮して、IG は IMO に対し、DRI (D) の最新版を含む DRI スケジュール改定案の起草について、独立した専門家の意見を支援してきました。

DRI (D) の危険性

DRI (D) の項目では、ばら積みで取り扱う際の潜在的な温度上昇と、空気や水との反応による水素ガスと熱の生成による過熱、火災、爆発のリスクについて言及しています。

DRI (D) は酸素と反応して熱を生成しますが、高密度な状態と粒子間の非常に小さなスペースは、他のタイプの DRI、特に大型のブリケット/ペレット状のものほど、酸素/新鮮な空気が積荷内に拡散しません。この低い透過性は、自己発熱が二次的な危険性であると考えられていることを意味します。観察された主な危険性は、DRI と水/水分との反応による水素生成です。新しい DRI (D) スケジュールの焦点は、アレージスペースの水素ガス濃度の測定と制御にあります。

自己発熱は二次的な危険性であると考えられていますが、空気との反応は貨物スペースおよび可燃性ガス（つまり、水素）が蓄積する可能性のある隣接するスペースの酸素欠乏を引き起こす可能性があります。したがって、コードは、そのようなスペースが換気され、ガスフリーであることが確認されない限り、誰も積載された貨物スペース（または密閉された隣接スペース）に入ってはならないと規定しています。

コードはここで、船舶の密閉されたスペースへの立ち入りに関する改訂された勧告（決議 A.1050(27)）を参照しています。

DRI (D) 貨物は、運送許容水分値を超える水分含有量で輸送された場合、液状化する可能性があります。その反応性の危険によるグループ B 指定に加えて、コードではグループ A 貨物としても分類されます。

DRI (D) の取り扱い中に発生する粉塵は、健康に有害な場合があります（呼吸器系への刺激や眼の損傷）。

貨物の準備と積み込み

船倉

他の DRI 貨物と同様に、DRI (D) の輸送のために準備される貨物スペースは、清潔で乾燥しており、塩や以前の貨物の残留物がない状態である必要があります。木製のバテン、緩いダンネージ、破片、その他の可燃性物質はすべて取り除く必要があります。

塩に関する具体的な言及は、DRI と水の反応が、塩が存在する場合、存在しない場合よりも激しいためです（言い換えれば、DRI は真水よりも海水とより反応しやすいということです）。

貨物の熟成

積み込みのために準備される貨物については、屋外保管が許可されています。ただし、保管中は、大気にさらされるように配置され、自然熟成が促進される必要があります。

この「熟成」とは、粒子の外部および内部表面の最も活性な部位が大気中の酸素と反応し、輸送中のさらなる反応に対して「不動態化」されるプロセスです。

貨物は、積み込み前に少なくとも 30 日間この方法で熟成される必要があります。荷送人は、貨物が適切に準備および熟成された（つまり、少なくとも 30 日間自然熟成された）ことを示す、積込港の管轄当局によって認められた者によって発行された証明書を船長に提供する必要があります。

荷送人はまた、貨物が IMDG クラス 4.2 の基準を満たしていない（つまり、自己発熱する可能性がない）ことを示す、積込港の管轄当局によって認められた者によって発行された証明書を船長に提供する必要があります。

これは事実上、貨物を自己発熱をする可能性のある DRI (B) のように扱わないと宣言することです。

水分

屋外保管は許可されていますが、液状化のリスクがあるため、積荷作業中は水分含有量を TML 未満に保つ必要があります。これは、雨の中で貨物を扱ってはならず、作業中でないハッチは閉じたままにする必要があることを意味します。特定の船倉内の貨物全体がその港で荷揚げされる限り、雨中荷役は許可されます。

DRI 微粉の TML は通常 9～12% です（IIMA ウェブサイト www.metallics.org にある IIMA 出版物「直接還元鉄副産物微粉 (DRI D) : 取り扱い、保管、および輸送のガイド」を参照してください）。

いったん屋外に荷揚げされると、水素生成と液状化の潜在的な危険性はもはや適用されません。

温度

高温の DRI は積み込まないでください。閾値温度は 65°C であり、積込前の 3 日間連続して貯蔵場で測定が行われます。測定は、貯蔵場全体で 3m 間隔で表面下 20~30cm で行われます。積込中にも温度を測定し、各ロットの温度を詳細に記録したログを作成し、そのコピーを船長に提供する必要があります。積込後、熱電対を貨物内に配置し、船倉に入らずに貨物温度を遠隔監視します。

この方法での温度測定は、貨物の高い熱絶縁のために制限される場合があります。これは、船倉全体の孤立した地点での測定が、積荷のバルク状態を示さない可能性があることを意味します。また、熱電対の位置から離れた積荷の局所的な加熱「ホットスポット」が見逃される可能性があります。とはいえ、船倉あたり 1 つまたは 2 つの場所にしかなく、したがって全体を示すものではないビルジサウンディングパイプまたは「温度」サウンディングパイプからの単一の測定よりも、積荷内に配置された熱電対のネットワークの方が望ましいです。

ハッチカバーの閉鎖

天候が許せば、積込完了後、貨物の冷却、貨物温度の安定化、および船倉の自然換気を可能にするために、ハッチカバーを開いたままにする必要があります。

これは、作業中でないハッチを閉じたままにするという現在の助言に反するように思われます（上記参照）。意図は、作業中でないハッチの閉鎖は、雨（該当する場合）による貨物の濡れを防ぐためであると思われますが、積込が完了し、そうする機会がある場合（つまり、乾燥した天候の期間）、熱放散と自然換気を助けるためにハッチカバーを開いたままにする必要があります。

積み込みが完了し、ハッチカバーが閉じられたら、コードは、貨物温度が安定し、65°C を超えず、上部空間の水素濃度が安定し、少なくとも 12 時間連続して体積で 1%を超えないことを確認するために、船が出航する前に少なくとも 24 時間待機することを求めています。

水素は可燃性ガスです。空気と可燃性混合物を形成するために必要な水素の最小濃度は体積で 4% です。これは「爆発下限界」または LEL です。したがって、ここで言及されている体積で 1%は、LEL の 4 分の 1（LEL の 25%）を表します。体積で 1%を超えないことは、この「アクションレベル」と、爆発が発生する可能性のある空気中の最低水素濃度である体積で 4%との間に安全マージンを与えます。

証明

出航前に、積込港の管轄当局によって認められた者によって、直径 12mm を超える材料の割合が重量で 3%以下であり、水分含有量が少なくとも 2%であり、TML 未満であり、積み込まれた貨物の温度が 65°C を超えないことを示す追加の証明書が発行されます。

したがって、コードのこのセクションでは、荷送人が貨物について次の 3 つの証明書を提供することを求めています。

- (i) IMDG クラス 4.2 の基準を満たしていないこと。
- (ii) 適切に熟成されていること。
- (iii) 大きな粒子の割合、水分含有量、温度が規定値以下であること。

さらに、船長には積込中の貨物の温度ログが荷送人から提供されます。

輸送と貨物管理

一般的な注意事項

上記のように、DRI (D) の輸送に関連する主な危険性は、船倉の上部空間内での可燃性ガスである水素の生成です。他の DRI 貨物タイプとは異なり、タイプ D の項目では、航海前に実施される リスク評価 について言及しており、このリスク評価は荷送人から提供される「水素発生リスク及びその発生率に影響を及ぼす可能性のある要因に関する包括的な情報」に基づいています。

このリスク評価には、航海中に予想される気象条件、船舶の速度と荷揚港までの距離、途中の避難港の利用可能性、および入手可能な水素放出に関する情報などの他の要因が含まれる場合があります。船長は、荷送人の助けを借りて、積込開始前に乗組員が関連するリスクについて適切に説明を受けるようにする必要があります。

船舶には、水素と酸素の濃度を測定する手段が装備されている必要があります。これは、各船倉のガスサンプリングポイントに挿入できるポンプとホースの長さを備えた適切に構成されたガス検出器を使用して実現されます。

実際には、コードの推奨に従って、船倉ガスの測定と貨物温度の測定は、荷送人が任命した経験豊富な貨物技術者が行うのが一般的です。コードは、技術者が積み込み中および航海中に立ち会うことを推奨しています。

コードは、このような測定装置が酸素欠乏雰囲気での使用に適していることを求めています。これは、水素に敏感な一部の可燃性ガス分析装置（「接触燃焼式センサー」）が、正しく動作するために最小限の酸素レベルを必要とするためです。DRI 貨物でよく見られる酸素欠乏雰囲気では、接触燃焼式センサーは信頼性の高い結果を提供しない場合があります。同様に、低酸素環境で動作できる他のタイプの可燃性ガスセンサーの一部は、水素を検出しません。したがって、適切なセンサー機器の選択は、すべての DRI 貨物にとって非常に重要です。

換気

コードは、水素濃度を体積で 1%（LEL の 25%）未満に維持するために、各船倉に機械的な表面換気を提供する必要があることを規定しています。

可燃性雰囲気存在のリスクを考慮すると、防爆環境での使用に適したファンのみを機械換気に使用する必要があります。また、適用される換気が表面換気であり、新鮮な空気が積み荷自体に導入されないこと（たとえば、船倉の下部のファンダクトを介して）も重要です。これは、バルク内の酸化反応を促進し、生成される熱の増加と反応速度の増加につながる可能性があるためです。

換気は、貨物に新鮮な空気/酸素が導入されるリスクを最小限に抑えるために、水素ガスの蓄積を体積で 1%未満に除去するために必要な時間に制限する必要があります。換気を適用する時間と頻度は、ある程度は過去の経験から導き出されます。この点で、コードは 時間ベースのガス予測曲線 の概念を導入しています。その結果は、航海リスク評価を更新するために使用する必要があります。

時間ベースのガス予測曲線は、水素発生速度を理解するためのツールです。これは、時間の経過に伴う水素発生をグラフで表したものであり、換気によって濃度が体積で<0.2%（つまり、LEL の5%未満）に低下した後、各船倉の上部空間の水素濃度を測定し、このデータを時間に対してプロットすることによって作成されます。機械換気を停止し、自然換気口を閉じた状態で、次の24時間、または水素濃度が体積で1%を超えるまでのいずれか早い方まで、2時間ごとに測定が行われます。次に、データを使用して、換気がない状態で水素濃度が体積で1%に達するまでの時間を推定し、この時間を使用して換気スケジュールを最適化できます。また、悪天候時に換気を適用できない場合に、水素ガスが船倉内にどれだけ早く蓄積する可能性があるかを理解するのに役立ちます。これらの情報はすべて、リスク評価プロセスにフィードされます。

ガス濃度データを分析し、適切な換気体制を導き出すには、専門家の支援が必要になる場合があります。

機械換気は、外部から空気を吹き込むのではなく、排気によって行われる必要があります。排出されたガスを安全な場所（たとえば、居住区から離れた場所）に除去する排気ダクトを使用します。2セットの予備の換気装置を船内に用意する必要があります。乗組員またはその他の許可された者は、その設置、操作、および保守に精通している必要があります。コードは、貨物1トンにつき1時間あたり1.2 m³の最小空気流量を規定しています。

緊急手順

水素濃度が体積で1%に近づいているか、または超えている場合は、濃度が体積で0.2%以下になるまで、該当する船倉を換気（機械的および/または自然な表面換気による）する必要があります。水素濃度が体積で1%を超える場合は、状況が許す限り、より頻繁に（できれば1時間毎に）測定する必要があります。水素濃度の上昇が続く場合は、専門家の支援が必要になる場合があります。

特にガス検出器の遠隔検知ホースが吸気または排出ガスの流れの中で船倉に挿入されている場合に換気中のガス濃度を測定しても信頼性の低い結果につながる可能性があることが示されています。従って換気中にガスを測定する場合は注意が必要であり、目安にしかない可能性があります。正確なガス測定は、たとえ数十分程度の短時間であっても、換気が停止した後にもみ可能になる場合があります。

機械換気が故障した場合、機械ファンが復旧出来るまで、継続的な自然換気を適用できます。もちろん、気象条件を考慮する必要があります。水素濃度と貨物温度の監視頻度を増やす必要があります。

貨物温度が65°Cを超えて上昇した場合、コードは、熱と水素を放散するために機械的及び自然換気を増やし、ガスと温度の測定頻度を増やすことを求めています。貨物にCO₂、水、または蒸気を使用することは禁じられていますが、可能であれば隔壁冷却（例えば隣接する空の船倉から水を噴霧する）が推奨されています。

コードは、貨物が高温を示す可能性のある状況を規定していません。空気や酸素との反応による加熱を示す貨物を換気することは明らかに問題がある可能性があります。状況によっては、専門家の助言を求めることが適切である場合があります。専門家の関与は、積込以降の温度とガス濃度のログを含む、貨物の完全な履歴の検討を必ず含める必要があります。

荷揚げ

ハッチカバーは、船倉の上部空間の水素濃度が体積で 1%未満であることが確認された場合にのみ開ける必要があります。したがって、荷揚げを開始する前に、この閾値を達成するために追加の換気が必要になる場合があります。

体積で 1%の水素濃度は、爆発下限界を大幅に下回っており、安全上のマージンが確保されています。さらにハッチカバーがわずかにでも開かれると、船倉内の水素含有量がますます希釈され、安全マージンがさらに増えます。

上記のように、コードは雨中の DRI (D) 貨物の荷揚げを許可していますが、船倉内の貨物全体が同じ港で荷揚げされ、別の船舶に移し替えられたり、(濡れた) 貨物の一部が船に残されたりしない場合に限りです。荷揚げ港で雨天時に船倉を閉じる必要がある場合は、これらの船倉について水素濃度監視プロセスを再開する必要があります。

まとめ

DRI タイプ D の IMSBC コードは、既存のタイプ C 項目とは大きく異なります。どちらも微粒副生物に関するものですが、タイプ D 項目は、空気中の酸素との反応による自己発熱ではなく、水との反応による水素発生という微粉の主な危険性を認識しています。従ってコードの焦点は、表面換気による水素ガス濃度の測定と制御にあります。これは、水分と空気の両方の排除が安全の基礎となる他の DRI のコード項目とは異なります。

従って船長と乗組員は、距離、速度、潜在的な避難港の位置、気象条件を考慮して、特定の航海の水素発生リスクの評価に効果的に貢献できるように、適切な訓練を受ける必要があります。さらに、各船倉内の水素濃度が安全限界（体積比 1%、つまり LEL の 25%）に達するまでの時間を推定するため、時間ベースのガス予測曲線がプロットし、このデータは換気戦略最適化のために使用されます。通常、荷送人はこのプロセスを支援するために専門の貨物技術者を提供することが期待されます。

貨物技術者の役割は、スケジュールの付録でより詳細に定義されており、次の責任が含まれます。

- ・ 積込作業中の監視と適切な助言の提供。
- ・ 温度測定のための熱電対の設置に関する助言と監督。
- ・ 貨物パラメータ（温度とガス濃度）の監視と報告。
- ・ 時間ベースのガス予測曲線の作成における船長と乗組員の支援と助言。
- ・ 航海中の換気システムの操作に関する船長と乗組員との助言と調整。

追加情報は、IIMA ウェブサイト www.metallics.org にある IIMA 出版物「直接還元鉄微粒副生物 (DRI D) : 取り扱い、保管、および輸送のガイド」に記載されています。