

LNG 船推進システムのリスク評価

技術研究所

1 はじめに

低温式の液化ガス運搬船（LNG 船）では、外気から侵入する熱と船体運動により貨物の一部がボイルオフガス（BOG）となって発生する。これまでの LNG 船の推進装置としては、このボイルオフガスをボイラ用の燃料として使用できるため、蒸気タービンが主流であった。しかし、近年になって、再液化装置付きの油焚きディーゼル主機、二元燃料ディーゼル発電機関を用いた電気推進装置、あるいは二元燃料ディーゼル主機等が蒸気タービンに替わる推進装置として検討されるようになり、その一部は既に実用に供している。

LNG 船に対して船級規則で要求される主機及び推進軸系の冗長性は、一般の商船と同様であり、LNG 船であるからといって別段の要求があるわけではない。構成部品に信頼性があるならば主機は単一でよく、1 事象の故障（single fault 又は single point failure）に対しては、航海可能な速力（7 ノット又は満載喫水状態で規則に定める速力の 1/2 の速力）を保持することが一般的な要件となる。

ただし、上記にかかわらず

- LNG のサプライチェーンの一環として求められる定時運航
- ターミナルにおける主機スタンバイの要件

等の LNG 運搬船の特殊性より、プロジェクトとして主機の冗長性が事実上要求される。このことから、特に信頼性が高いと判断される機器（軸、減速機等）を除き、推進システムには冗長性が要求される。

推進機関及び部品の冗長性は、これまでは経験的に定めるのが一般的であった。蒸気タービン船のタービンは、高圧タービンと低圧タービンの単独運転が可能である。また、ディーゼル主機は 2 台、電気推進システムの推進モータは 2 台設置するのが一般的である。このように、機関又は機器の冗長性については、単に 2 台設置すればよいという判断のみで、これまで冗長性のレベルを理論的に解析した例はほとんどない。

冗長性は推進システムだけでなく BOG 処理装置にも要求される。BOG 処理装置が故障した場合、BOG を大気放出せざるを得ない。このような状況に対処するため IGC コードでは、原則として BOG 処理装置の二重化を要求している。蒸気タービン船においては、主ボイラが BOG 処理装置

であり、主ボイラによる燃焼で発生する余剰蒸気はダンプコンデンサにより処理され、余剰の熱量は海水に廃棄される。ボイラ以外の BOG 処理装置としては二元燃料ディーゼル機関（DFD 機関）、再液化装置、ガス焼却炉（GCU）等がある。これらのうち、再液化装置の冗長性については IGC コードに明確な規定があるが、それ以外については規定がない。

本報告は、リスク評価を判断ツールとして、LNG 船の推進システム及び BOG 処理装置に要求される冗長性に関する調査結果をまとめたものである。

2 リスク評価対象システム

リスク評価の対象とした 4 種類の推進システム（BOG 処理装置を含む）の基本構成を図 1 に示す。

- (a) 従来の蒸気タービン推進システムであり、低圧タービン、高圧タービン各 1 台と主ボイラ 2 台を装備している。発電機に関しては、蒸気タービン駆動発電機を 2 台、ディーゼル機関駆動発電機を 1 台とした。
- (b) 通常の油焚きディーゼル主機を 2 台装備したシステムである。発電機に関しては、ディーゼル機関駆動発電機を 3 台とした。この推進システムの場合、BOG 処理装置としては、再液化装置を用いるのが一般的である。
- (c) 電気推進システムであり、DFD 機関を用いた典型的なシステムの例である。DFD 機関により駆動される発電機を 4 台とし、また、推進用モータは 2 台とした。BOG 処理装置としては、再液化装置、ガス焼却炉（GCU）、補助ボイラ等が考えられるが、ここではガス焼却炉 1 台とした。
- (d) DFD 機関を推進機関として使用するシステムであるが、まだ実現してはいない。DFD 主機を 2 台、ディーゼル機関駆動発電機を 3 台とするシステムとした。BOG 処理装置としては、(c) と同様、ガス焼却炉 1 台とした。

3 リスク評価システム

機器の冗長性は、次の 3 つのステップを経て決定される。

STEP 1: 信頼性解析によりシステム全体の故障率と平均修復時間を求める。

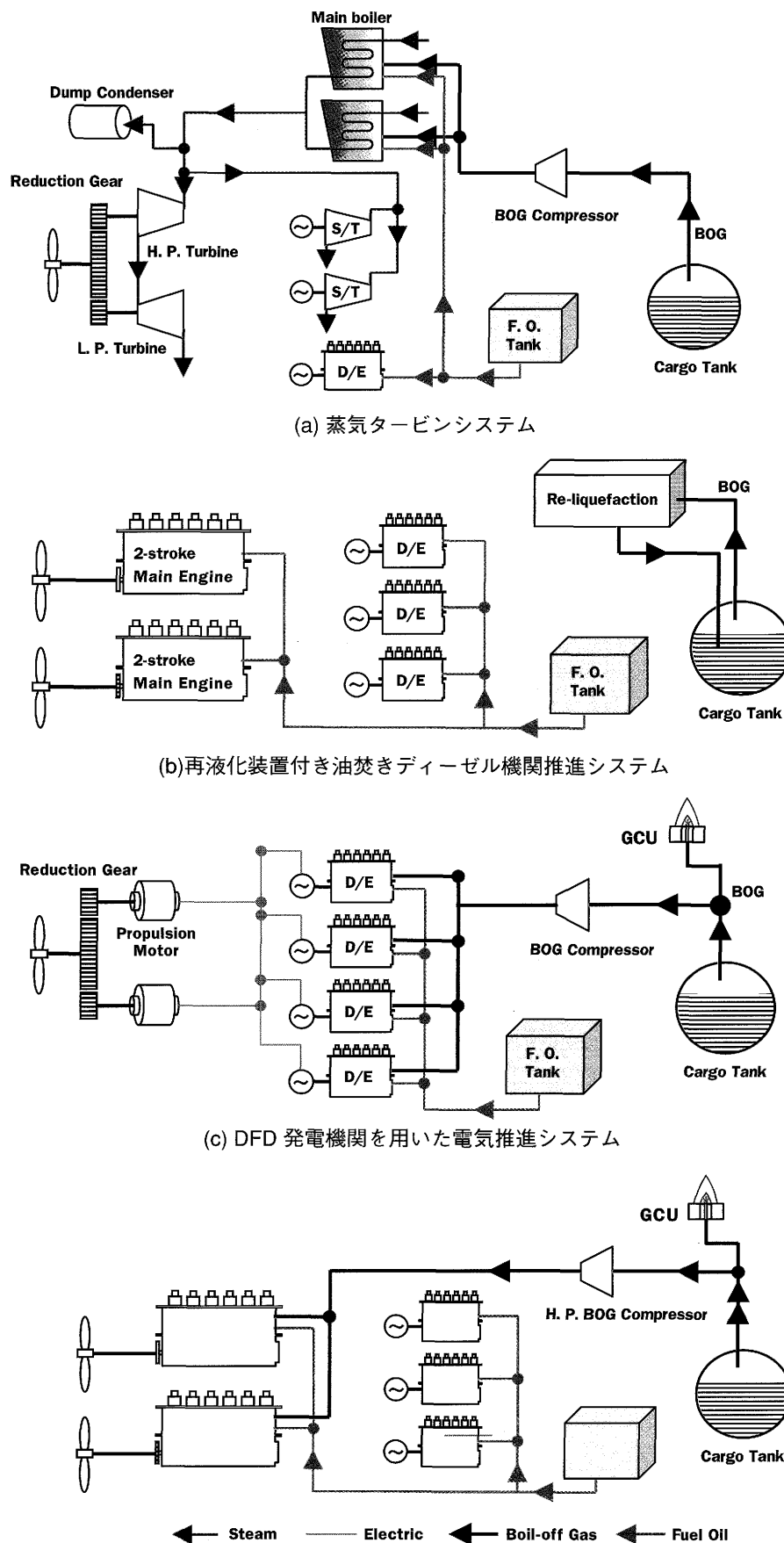


図1 リスク評価対象システム

STEP 2: 故障率と平均修復時間からリスク及びアベイラビリティを求める。

STEP 3: リスク及びアベイラビリティを判断指標として機器の冗長性を判断する。

$$A = \mu / (\lambda + \mu)$$

$$\lambda = 1 / \text{MTBF}$$

$$\mu = 1 / \text{MTTR}$$

3.1 信頼性解析

信頼性解析としては、米国のRelex社製の信頼性解析ソフトウェアを用い、FTA (Fault Tree Analysis) によりシステム全体の故障率と平均修復時間を求めた。FTAにおいては、はじめにトップ事象を定め、トップ事象に至る基本事象（機器の故障）を展開し、基本事象ごとに故障率（又は平均故障間隔）及び平均修理時間を与えることでトップ事象の故障率等が求められる。例えば、図2は蒸気タービン推進システムの解析例を示したものである。ここで、トップ事象は「自航不能」としており、「推進軸系故障」、「タービン故障」、「電源喪失」、「S/T1故障」、「D/E故障」等は中間事象である。「推進軸系故障」は「プロペラ故障」と「軸故障」の2つの基本事象からなり、これらの基本事象に故障率及び平均修理時間を入力することで、最終的にシステム全体での、すなわちシステムが「自航不能」となる場合の故障率と平均修理時間が得られる。

3.2 リスク及びアベイラビリティ

リスクは故障率×故障の重要度と定義される。故障の重要度としては、機関系の調査においては一般に表1のようなカテゴリ分けがなされるが、本研究では、例えば推進系においては故障の重要度を「自航不能」に特定して解析を行っており、従って、リスクは単純に故障率で表される。

表1 故障の重要度に関する分類

分類*	説明
Catastrophic	システム全損、死亡または重度の後遺症が残る人的被害
Severe	自航不能を引き起こすシステムの重大な損傷又は重度の人的被害
Significant	減速航行を余儀なくされるシステムの損傷又は人的被害
Minor	通常航行に支障を来さない程度の軽微なシステム損傷かつ人的被害なし

本研究ではリスクの他にアベイラビリティも判断指標の1つとしている。機器のアベイラビリティAは、故障率 λ [件/時間] 及び修復率 μ [件/時間] により次式で与えられる。

ここで、MTBF： 平均故障間隔 [時間/件]

MTTR： 平均修理時間 [時間/件]

3.3 故障率の推定

基本事象に与える故障率等のデータは、(独)海上技術安全研究所の船舶信頼性情報データベース (SRIC データベース) から得られる値とした。ただし、故障件数が少ない機器や運転実績がほとんどない機器のデータについては、信頼できるデータが存在しない。故障件数が少ない機器のデータは、大まかに故障の頻度を分類して値を推定した。DFD 機関等は運転実績がほとんどない機器であるが、これについては既存の油焚きディーゼル機関の故障率分布を求め、故障率が高い部分の値を平均して、すなわちDFD機関を比較的高い故障率を有する機関とみなして、故障率の推定を行った。

3.4 推進系の評価対象システム

推進システムを構成する機関又は機器の冗長性を検討するため、FTAのトップ事象を「自航不能」としてリスク評価を行った。評価対象システムを表2に示す。

表2 推進系の評価対象システム

評価対象システム	主機	発電機関
(a) 蒸気タービンシステム(従来システム)	LP x1, HP x1, ボイラ x2	ST x2, DE x1
(b) 油焚きディーゼル推進機関システム	DE x 2	DE x3
(b)' 同上	DE x 1	DE x3
(c) DFD発電機関を用いた電気推進システム	推進モータx2	DFD x4
(c)' 同上	推進モータx1	DFD x4
(d) DFD推進機関システム	DFD x2	DE x3
(d)' 同上	DFD x1	DE x3

注) DE：油焚きディーゼル機関、DFD：二元燃料ディーゼル機関、ST：蒸気タービン

表2で、(b)'、(c)'、(d)'はそれぞれ油焚きディーゼル主機、推進モータ及びDFD主機を1台とするシステムであり、このようなシステムのリスク評価を行うことで、機関及び推進モータの冗長性の検討が可能となる。

3.5 BOG処理装置の評価対象システム

再液化装置及びガス焼却炉を構成する機器の冗長性を検討するため、FTAのトップ事象を「BOG大気放出」としてリスク評価を行った。評価対象システムを表3に示す。評価対象システムは図1の基本システムの一部であり、BOG処理装置とそれを駆動するために必要な電源供給部で構成される。

表3 BOG処理装置の評価対象システム

評価対象システム	発電機関
(a) 主ボイラ x2 台 (従来システム)	ST x2, DE x1
(b) 再液化装置	DE x3
(c) ガス焼却炉 (ガスバーナ x2)	DFD x4
(c)' ガス焼却炉 (ガスバーナ x1)	DFD x4
(d) ガス焼却炉 (ガスバーナ x2)	DE x3

注) DE：油焚きディーゼル機関、DFD：二元燃料ディーゼル機関、ST：蒸気タービン

表3の(c)'のシステムは、(c)のシステムでガスバーナを1台としたケースであり、ガスバーナの冗長性を検討するために設けたものである。

4 評価結果

4.1 推進システムの冗長性

表2の計算結果を表4及び図3に示す。

表4 推進システムの冗長性

評価対象システム	λ [件 /1000 hr]	A
(a) 蒸気タービンシステム (従来システム)	0.751	0.9982
(b) 油焚きディーゼル推進機関システム (DE x 2)	0.551	0.9987
(b)' 同上 (DE x1)	1.139	0.9974
(c) DFD 発電機関を用いた電気推進システム (推進モータ x2)	0.463	0.9991
(c)' 同上 (推進モータ x1)	0.483	0.9991
(d) DFD 推進機関システム (DFD x 2)	0.463	0.9991
(d)' 同上 (DFD x1)	3.000	0.9945

計算結果より、推進システムの冗長性に関して次の知見が得られた。

- 基本システム(b)、(c)及び(d)は、従来の蒸気タービ

ン推進システム(a)よりも、故障率が低く、かつ、アベイラビリティが高く、十分な冗長性を有しているものと判断される。

- (c)のシステムで推進モータを1台とした場合(c)'であっても、故障率やアベイラビリティは(c)と大差なく、このことから推進モータは1台であっても差し支えないものと判断される。
- 油焚きディーゼル推進機関やDFD推進機関を1台とした(b)'及び(d)'のシステムでは、(a)と比較して明らかに故障率が高く、アベイラビリティが低いことから、(a)と同等以上の信頼性のあるシステムとするためにはこれらの機関は複数台設置する必要がある。

4.2 BOG処理装置の冗長性

表3の計算結果を表5に示す。再液化装置及びガス焼却炉の解析においては、故障率は推定したものの、修復時間までは推定できなかったため、システム全体の故障率（又はリスク）のみで評価した。

表5 BOG処理装置の故障率

評価対象システム	λ [件 /1000 hr]
(a) 蒸気タービンシステム (従来システム)	0.588
(b) 油焚きディーゼル推進機関システム+再液化装置	0.350
(c) DFD 発電機関を用いた電気推進システム+ガス焼却炉 (バーナー x2)	0.320
(c)' 同上 (バーナー x1)	0.330
(d) DFD 推進機関システム+ガス焼却炉 (バーナー x2)	0.320

計算結果より、BOG処理装置の冗長性に関して次の知見が得られた。

- 再液化装置を含む(b)及びガス焼却炉を含む(c)、(d)のシステムは、従来の蒸気タービン推進システム(a)よりも、故障率が低く、十分な冗長性を有しているものと判断される。
- (c)のシステムでガスバーナを1基とした場合(c)'であっても、故障率は(c)と大差なく、このことからガスバーナは1基であっても差し支えないものと判断される。

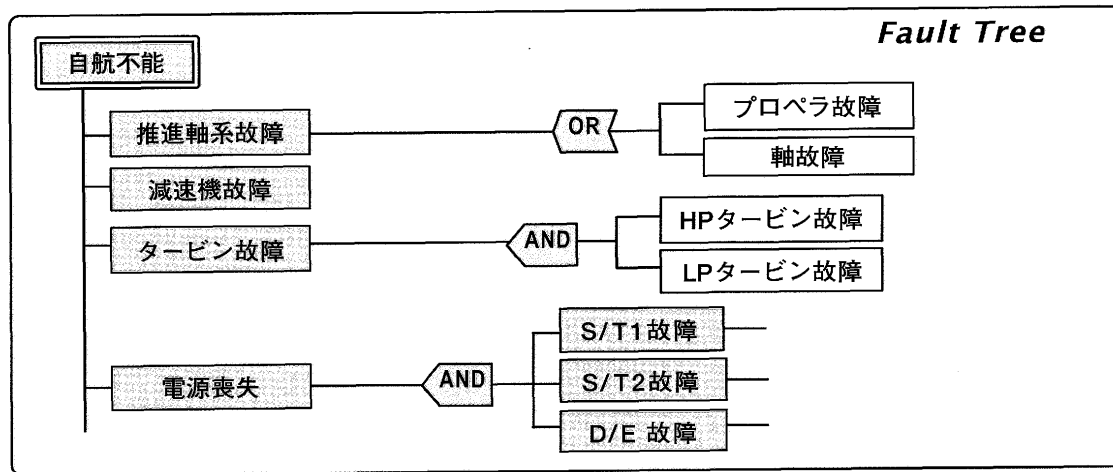
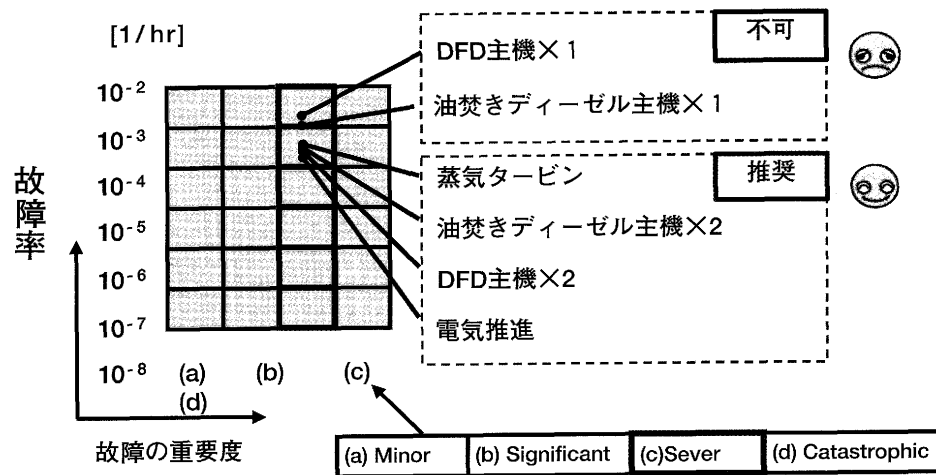
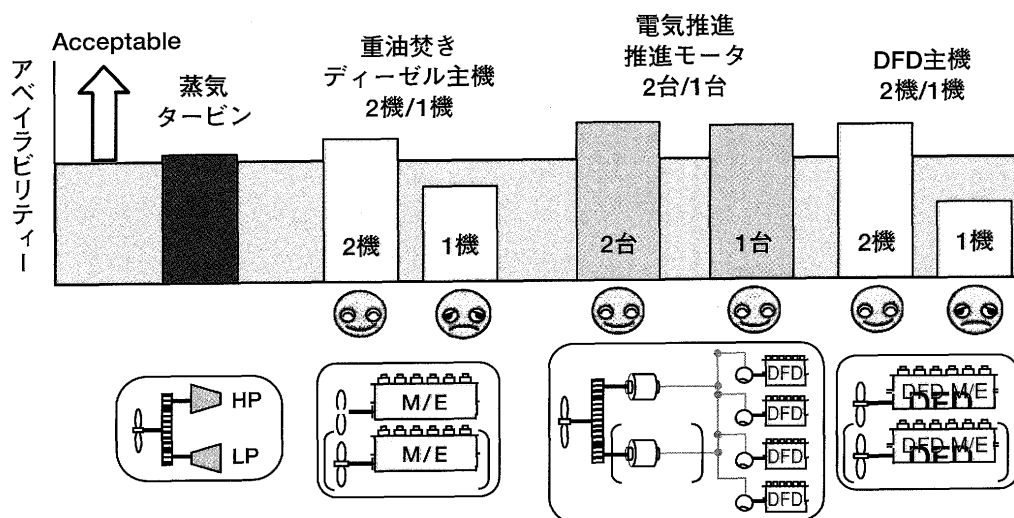


図2 蒸気タービン推進システムの解析例（一部）



(i) 推進システムのリスク



(ii) 推進システムのアベイラビリティ

図3 推進システムのリスク及びアベイラビリティ