

# 船体用機能材料 (耐腐食、耐疲労、耐脆性破壊)

新日鐵住金株式会社

稻見 彰則

# 船体用機能材料目次

## 1. 耐腐食鋼(原油タンカー塗装代替)

**NSGP<sup>®</sup>** : Nippon Steel & Sumitomo Metal Green Protect

## 2. 耐疲労鋼(継手疲労強度、疲労き裂進展特性向上)

**FCA<sup>®</sup>** : Fatigue Crack Arrester

## 3. 耐脆性破壊

(脆性破壊伝播停止特性に優れた鋼材)

Notes: "NSGP" and "FCA" are a registered trademark or trademark of Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation in Japan and other countries.

# IMOの原油タンカー原油タンクの防食基準内容

注. 内航船にも適用することを国交省が決定

- 対象船型 : dwt  $\geq 5,000$ の原油タンカー
- 適用開始 : 2013.1月1日以降 契約船  
又は 2016年1月1日以降完工船
- 防食範囲: 底面 $\sim 0.3\text{m}$  および 強力甲板と補強材  
(概略)

参考) NKガイドラインより抜粋

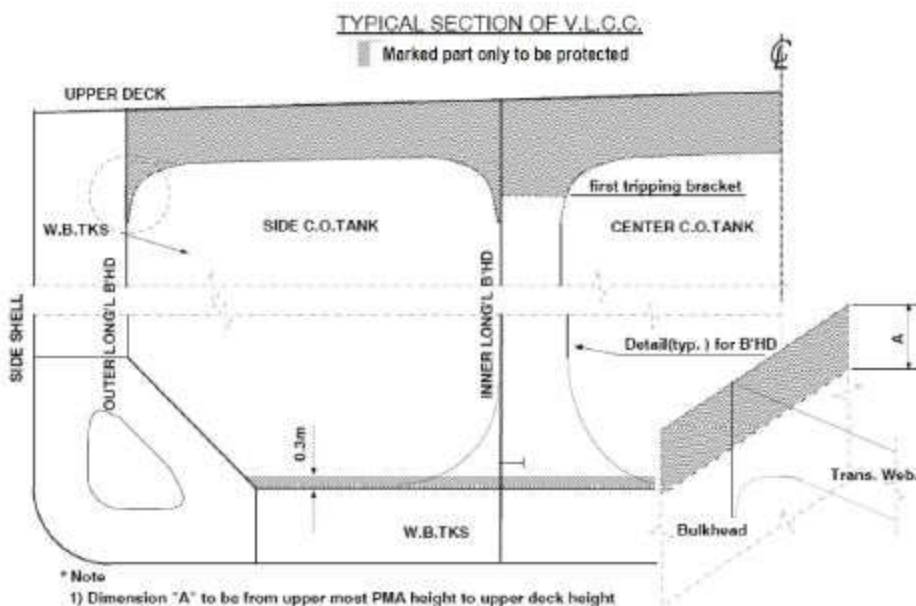


図 4.1 耐食鋼の適用範囲

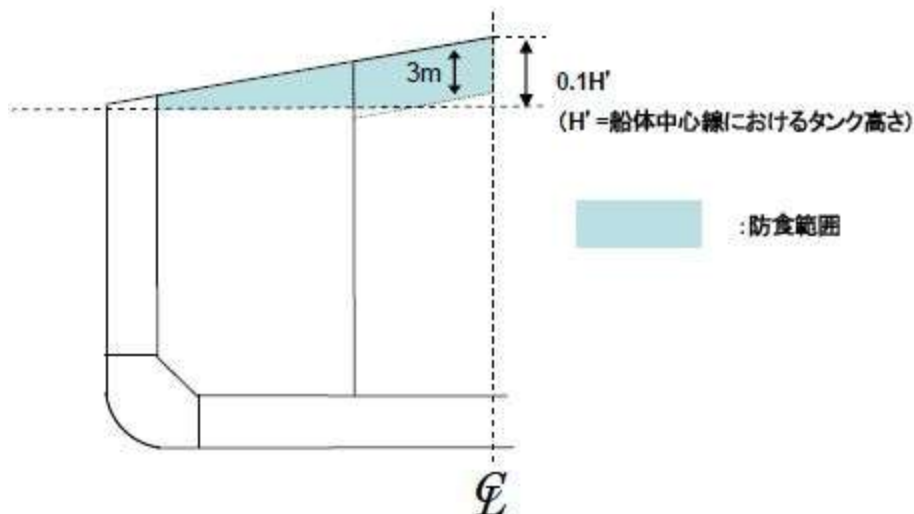
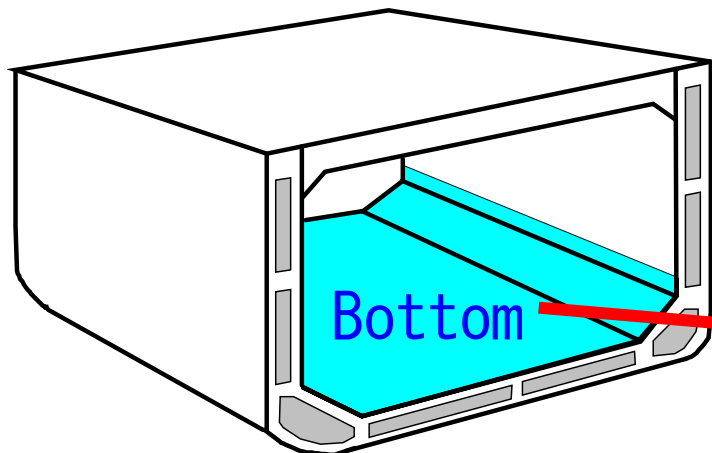


図 4.2 最高位の点検用設備が設置されていない場合

# 1.底板用耐食鋼 (NSGP-1)

腐食形態：孔食



**Pitting Corrosion**  
in **Cargo Oil Tanks**  
**Max.10mm/2.5year**

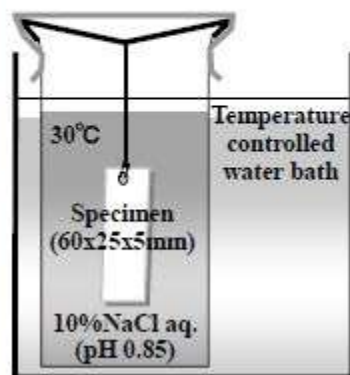
# 1.底板用耐食鋼 (NSGP-1)

## IMO腐食評価試験と結果:

○腐食試験方法:

当社案をベースとした日本案が採用

		Condition	
Solution	NaCl	10 mass%	
	pH	0.85 Adjusted by HCl solution	
	Amount	20 ml/cm <sup>2</sup> or more	
	Change	Every 24 hr.	
Gas		Air open	
Temperature		30°C	
Specimen	Size	25×60×5 mm	
	Surface	#600 emery paper	
	Repeat	N=5	
Duration		72 hr.	
Immersion		Dipping specimen	



○腐食試験結果:

- ・腐食速度は従来鋼の1/5以下
- ・IMO基準を大幅にクリア



# 1.底板用耐食鋼 (NSGP-1)

**NSGP-1の特徴**: 微量な成分により耐食性を確保しており、IACSの普通鋼の成分範囲を満足

A typical example of chemical composition of AH32 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Ceq
NSGP <sup>®</sup> -1	0.124	meets IACS Standard (including all ally elements)						0.331
従来鋼 (AH32)	0.140	0.20	1.09	0.018	0.006	0.031	0.014	0.322
IACS Standard	≤ 0.18	≤ 0.5	0.9~ 1.6	≤ 0.035	≤ 0.035	≥ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.36

NSGP<sup>®</sup>-1 は

新日鐵住金のノウハウを生かして  
微量な合金成分の組み合わせで  
高い耐食性を得ることに成功



溶接等の施工性は従来鋼と同等



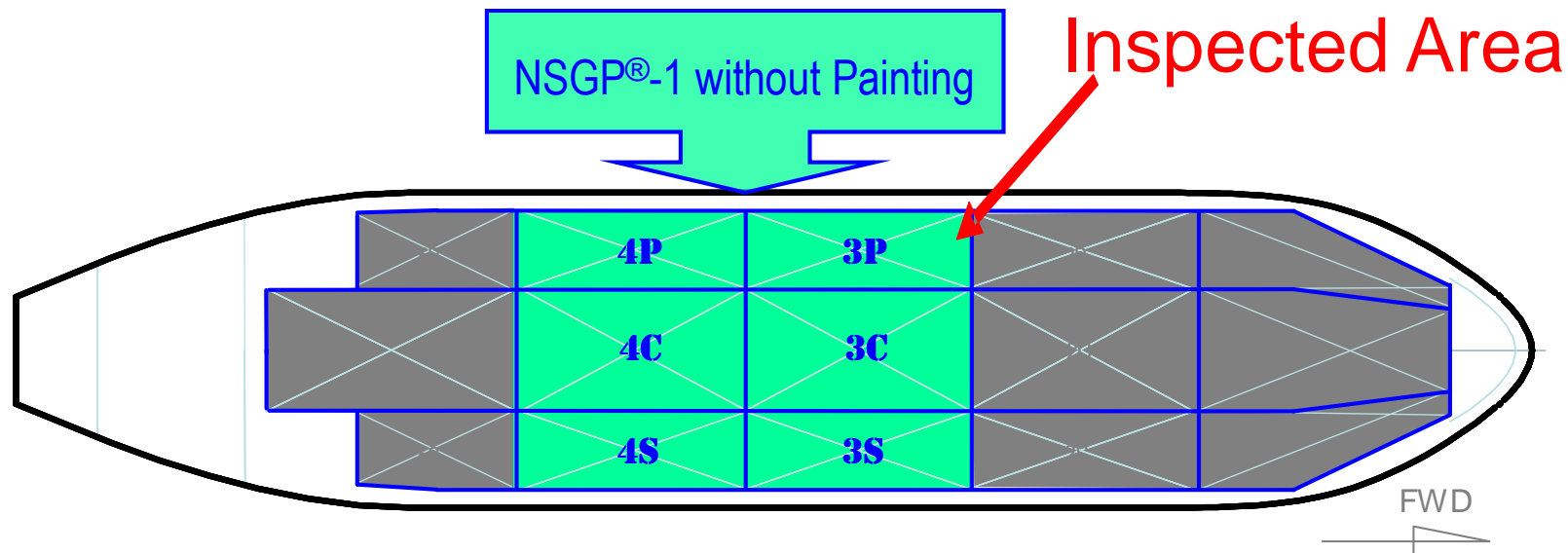
# 1.底板用耐食鋼 (NSGP-1)

実船試験：VLCCの6タンクに無塗装で適用



船名 : TAKAMINE  
 建造 : 三菱重工業 長崎造船所  
 適用タンク: 6タンク (#3と#4のセンター、両翼)

ドック調査 : 1回目 2.3年稼働後  
 2回目 5年稼働後



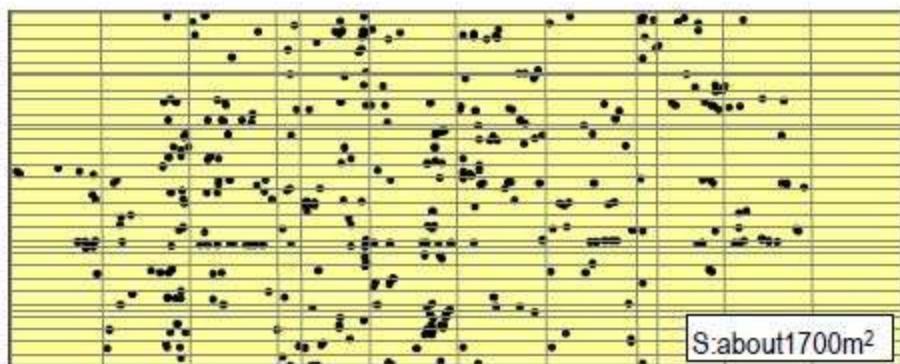
# 1.底板用耐食鋼(NSGP-1)

## 実船試験結果(1) :

従来鋼よりも大幅に低減。但し、COWの適用頻度等操業、構造的要因で、極めて少数ながら、深さ6mm以上で補修が必要なものも発生することがある。



図A. Takamineの耐食鋼の5年目のピットマップ(深さ $\geq 4$ mm)

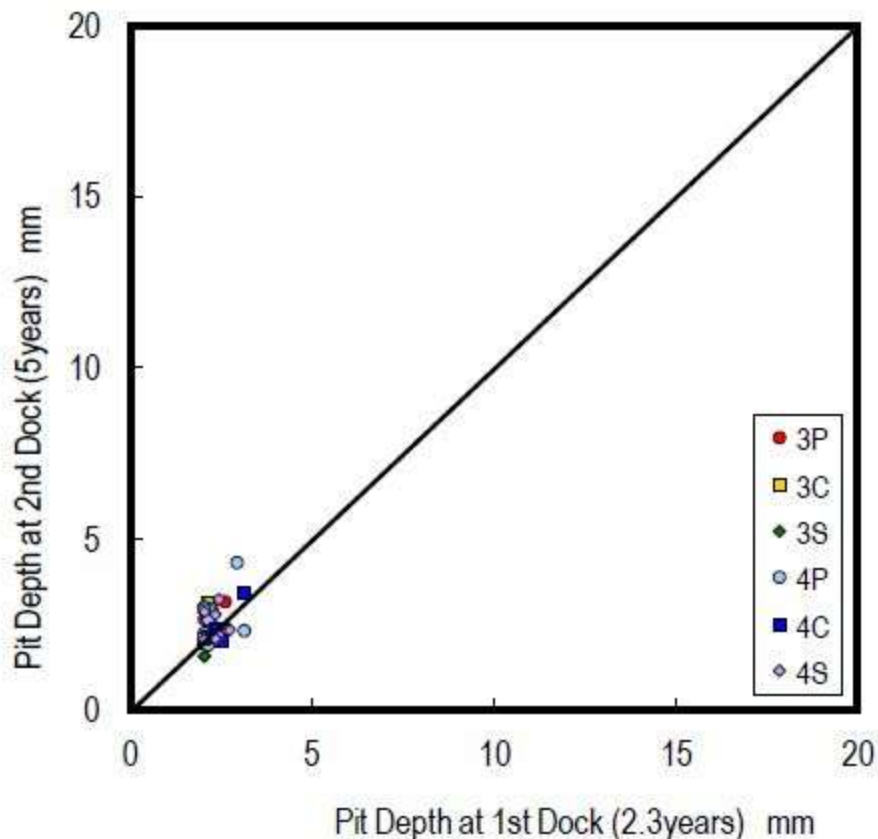


図B. 従来鋼の5年目のピットマップ例(深さ $\geq 4$ mm)



# 1.底板用耐食鋼(NSGP-1)

実船試験結果(2)：2.3年目に発見された孔食を5年目に観察



2.3年目と5年目で  
孔食の深さは変わらず



孔食の進展が1回目のドック時の  
洗浄・乾燥で止まることを直接証明

(SR242にて従来鋼使用船(10隻程度)で  
孔食の進展が止まることが指摘されており。一致。)

# 1.底板用耐食鋼 (NSGP-1)

## 実船試験結果(3) : VLCCでの結果

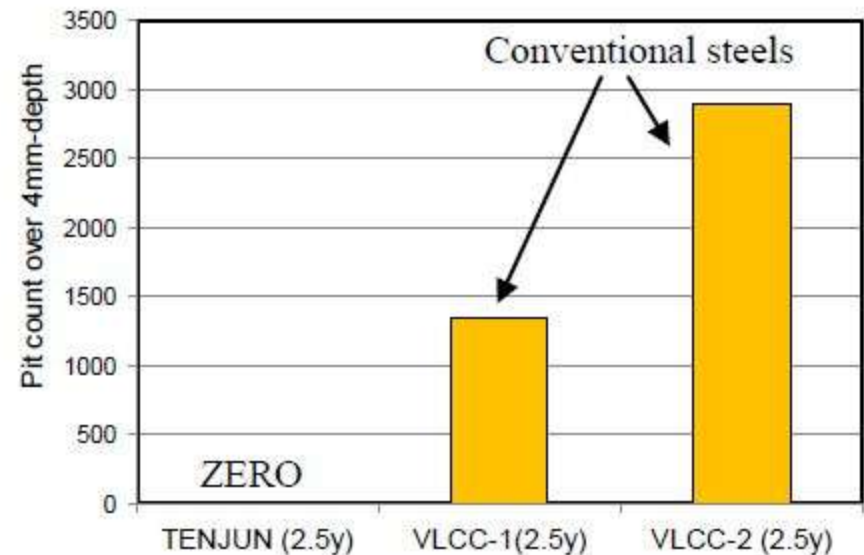


Photo 1 Newly built VLCC 'TENJUN' using the developed steel



\*P:Port side tank, C:Center tank, S:Starboard side tank

2.5年稼働後の結果：  
深さ > 4mmの孔食無し



# NSGP®-1の特長まとめ

- 1) 極めて高い耐食性
- 2) 微量合金添加のため溶接等の施工性も従来鋼と同等
- 3) 鋼材の化学成分で耐食性を持たせるため  
防食性能のバラツキが抑えられる
- 4) 新造時ドック内で塗装の損傷の心配が不要
- 5) 竣工後のメンテナンスも最小限化

尚、溶接材料についても、NSGP-1とのセットでIMO基準に合格したものをNK船級承認取得済み。(一部溶接用には専用溶材が必要(日鐵住金溶接工業製承認取得済み))

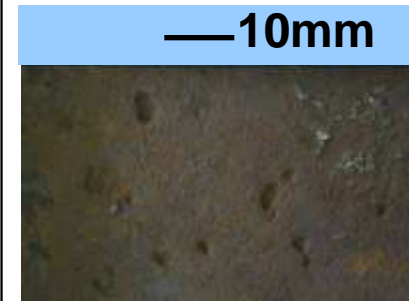
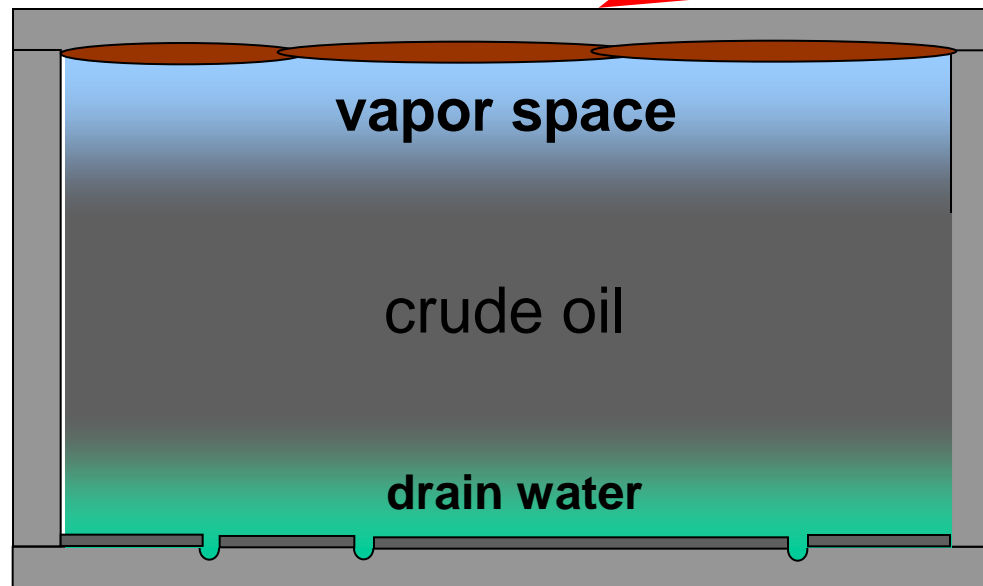
## 2.上甲板用耐食鋼 (NSGP-2)

腐食形態：全面腐食

**general corrosion**

- maximum corrosion rate > 0.1mm/y
- cost of repair painting, repainting

Upper Deck



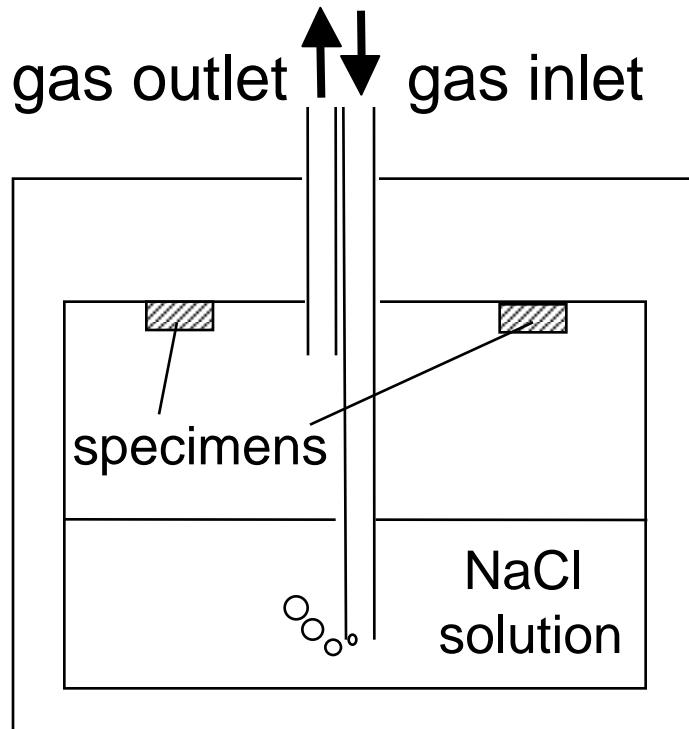
Bottom

- maximum pitting rate > 4mm/y
- pits initiate at defects of paint film

**pitting corrosion**

## 2.上甲板用耐食鋼(NSGP-2)

### 腐食のシュミレーション試験 (上甲板)



< Test conditions >

Temperature

50°C(20 h) ⇔ 25°C (4h)

[cyclic wet & dry condition]

Gas\*

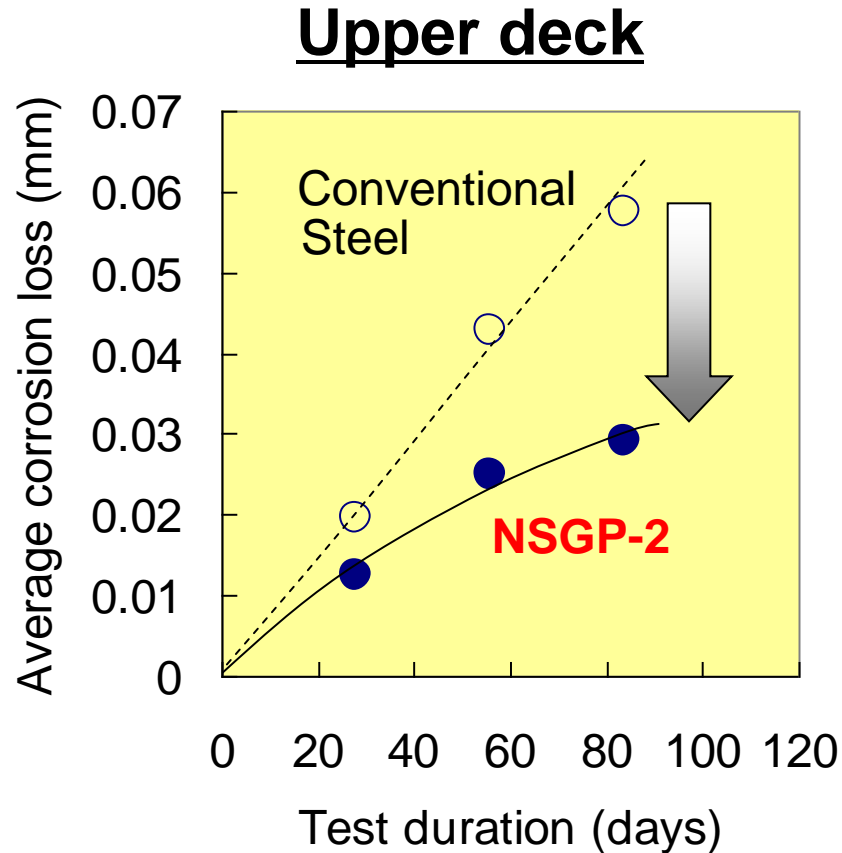
[A] 13%CO<sub>2</sub>-5%O<sub>2</sub>-0.01%SO<sub>2</sub>  
-bal.N<sub>2</sub> (simulated inert gas)

[B] simulated inert gas + **0.2%H<sub>2</sub>S**

\* Gas A and B are blew alternately every 2 weeks

## 2.上甲板用耐食鋼(NSGP-2)

### NSGP-2の腐食試験結果





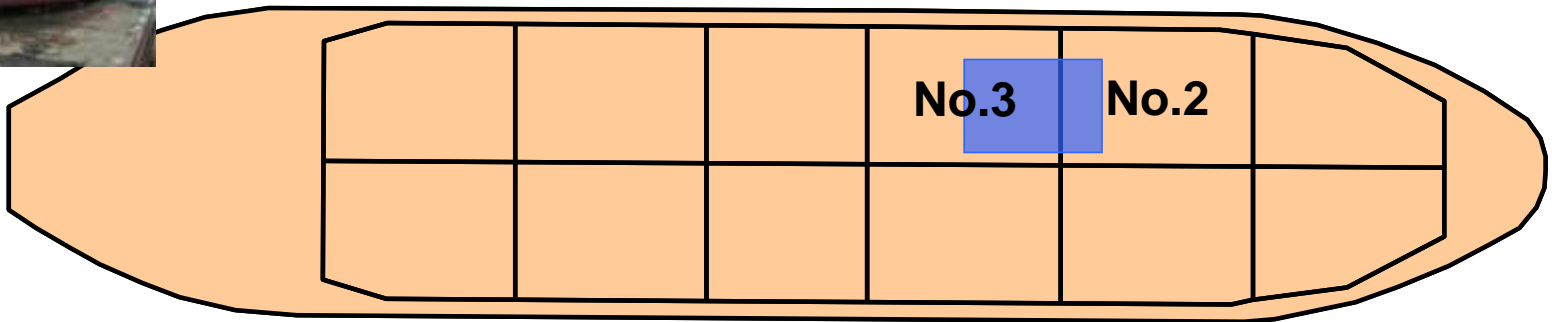
## 2.上甲板用耐食鋼(NSGP-2)

Aframax-1

NSGP-2の実船試験(適用範囲)



Upper deck

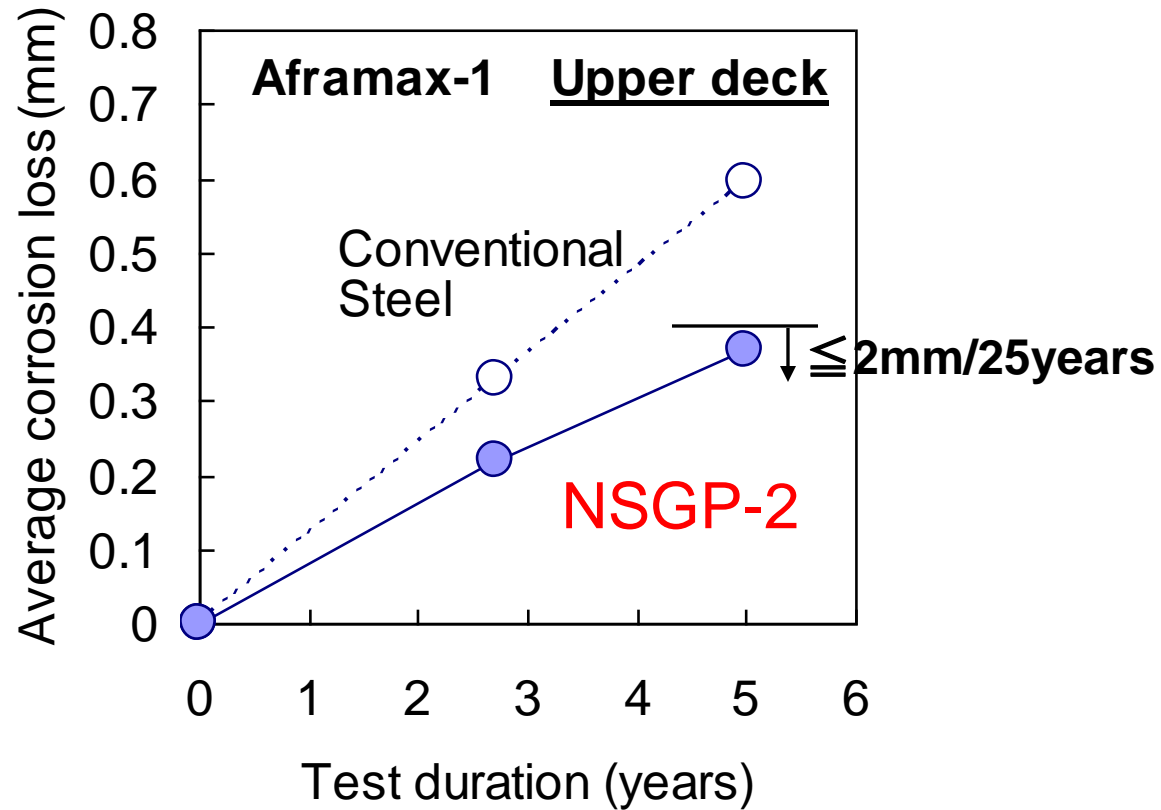


Applied to No.2 and No.3 COT for trial

## 2.上甲板用耐食鋼(NSGP-2)

Aframax-1

試験結果①(稼働後2.5年、5年)

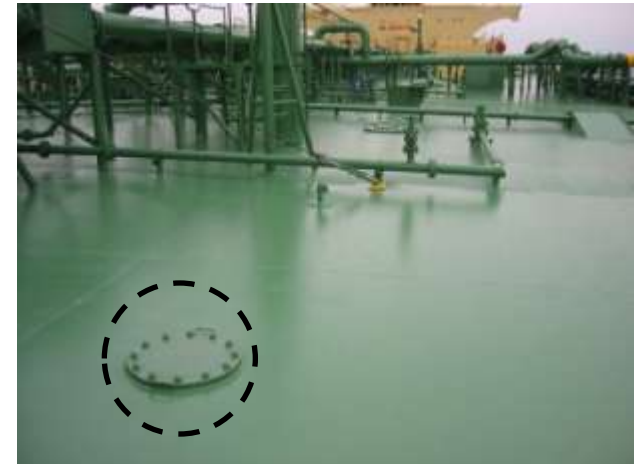
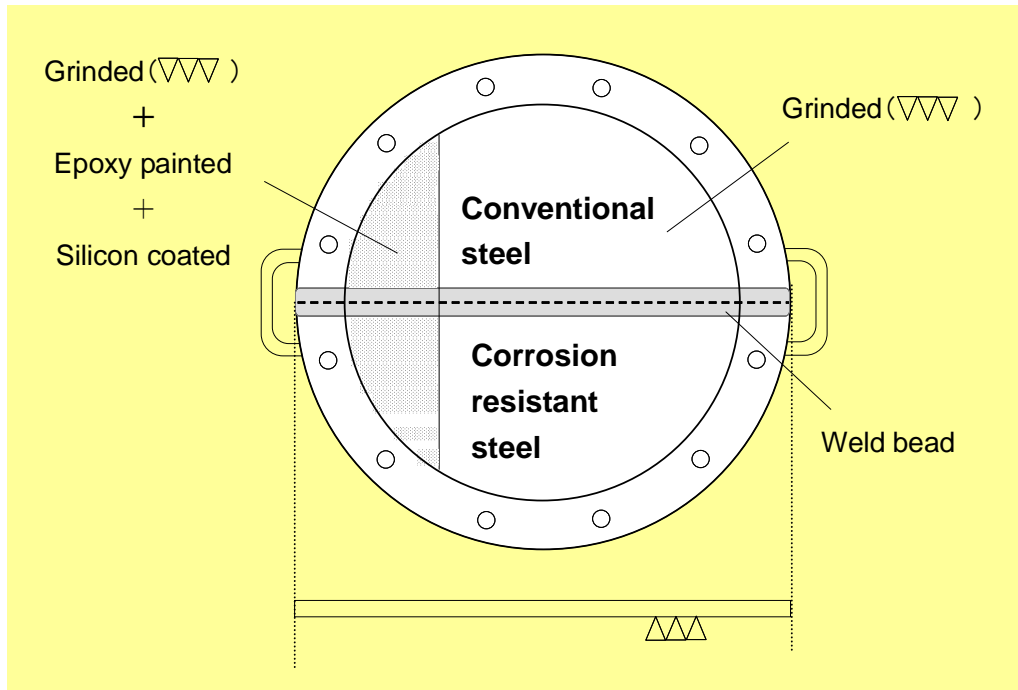


**Corrosion rate of developed steel  $\leq 0.08$  mm/y  
(2mm/25years)**

## 2.上甲板用耐食鋼(NSGP-2)

### 実船へでの暴露試験(マンホール)

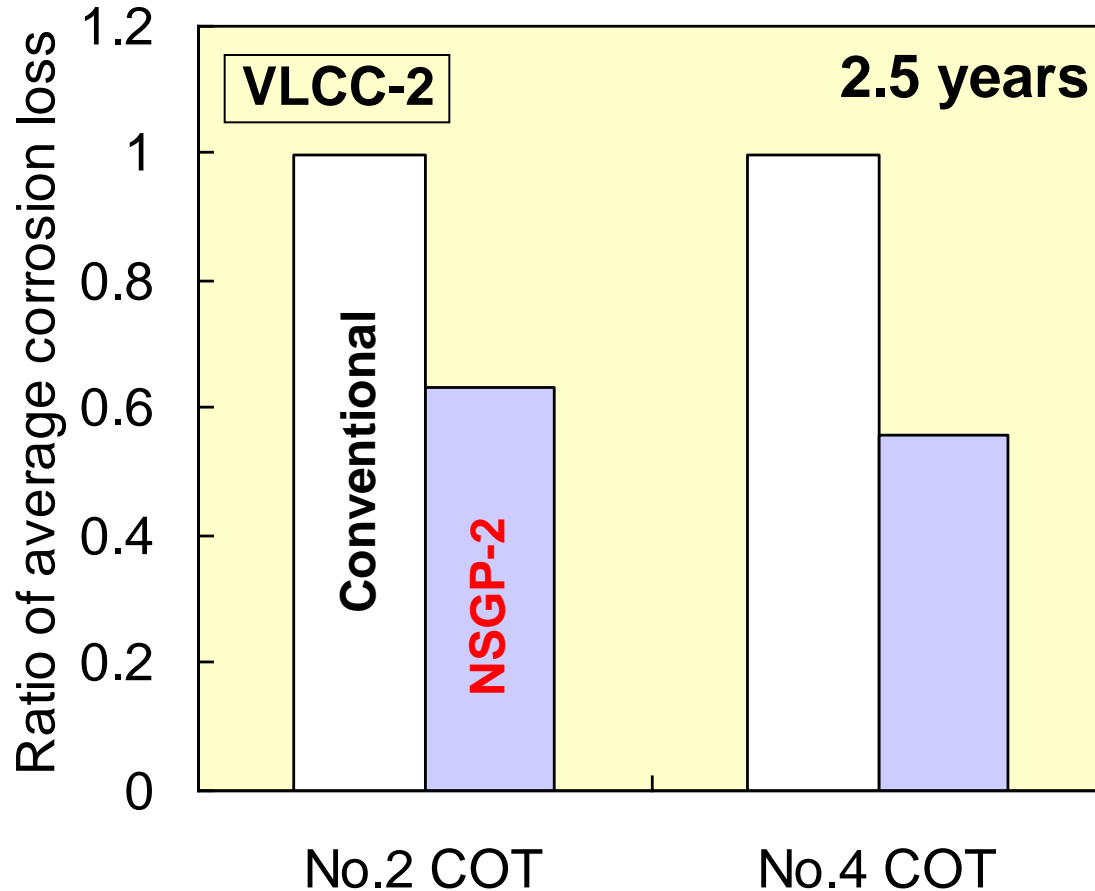
#### Test coupon for upper deck



## 2.上甲板用耐食鋼 (NSGP-2)

VLCC-2

試験結果②



**Corrosion loss : about 60% of conventional steel**

## ◆ 化学成分(例)

	C	Si	Mn	P	S	Sol. Al	その他
耐食鋼	0.08	0.19	0.95	0.008	0.002	0.027	硫化物形成元素の添加

## ◆ 機械特性(例)

	板厚 (mm)	引張試験			シャルピー試験	
		YS (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )	El (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー [平均] (J)
耐食鋼	16.5	<b>432</b>	<b>504</b>	<b>24</b>	-20	<b>258</b>
IACSスペック (Grade D32)		≧ 315	440/570	≧ 22		≧ 31 (Long.)

## ◆ 溶接継手特性(例)

### ■ 溶接条件

板厚	16.5mm
溶接方法	3電極FCB溶接 (片面1パス)
溶接材料	ワイヤ : US-36 フラックス : PFI-55E, PFI-50R
溶接条件	L : 1150A-33V T <sub>1</sub> : 800A-42V      61cm/min. T <sub>2</sub> : 800A-46V
入熱	108 kJ/cm

### ■ 継手靱性

	吸収エネルギー[0°C, 平均値] (J)				
	溶接金属部	Fusion Line	HAZ 1mm	HAZ 3mm	HAZ 5mm
耐食鋼	<b>174</b>	<b>132</b>	<b>172</b>	<b>224</b>	<b>250</b>
IACSスペック (Grade D32)	≧ 34				

# NSGP®-2の特長まとめ

- 1) 極めて高い耐食性 (従来鋼の50%~60%の腐食速度)
- 2) 溶接等の施工性も従来鋼と同等
- 3) 鋼材の化学成分で耐食性を持たせるため  
防食性能のバラツキが抑えられる
- 4) 新造時にドック内での足場設置を最小限化
- 5) 竣工後のメンテナンスも最小限化

注: NSGP-2は底板部にも耐食性能のあるRCWです。



# 1. 耐腐食鋼(原油タンカー塗装代替)

**NSGP<sup>®</sup> : Nippon Steel & Sumitomo Metal Green Protect**

# 2. 耐疲労鋼(継手疲労強度、疲労き裂進展特性向上)

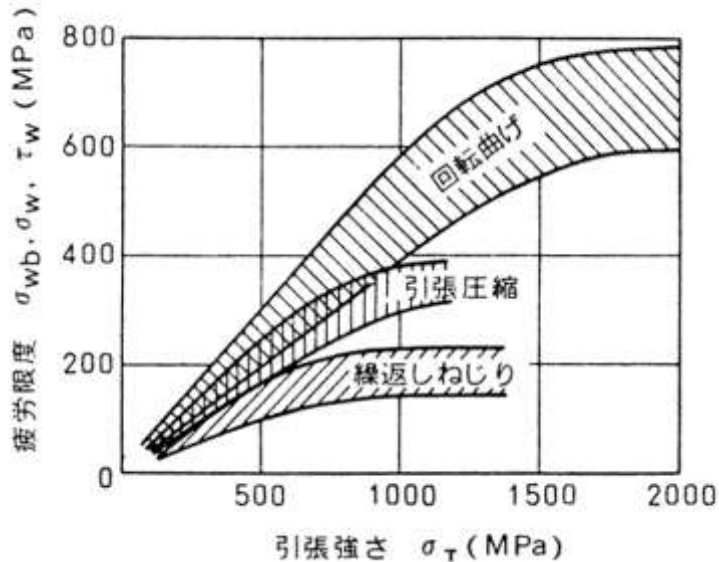
**FCA<sup>®</sup> : Fatigue Crack Arrester**

# 3. 耐脆性破壊

(脆性破壊伝播停止特性に優れた鋼材)

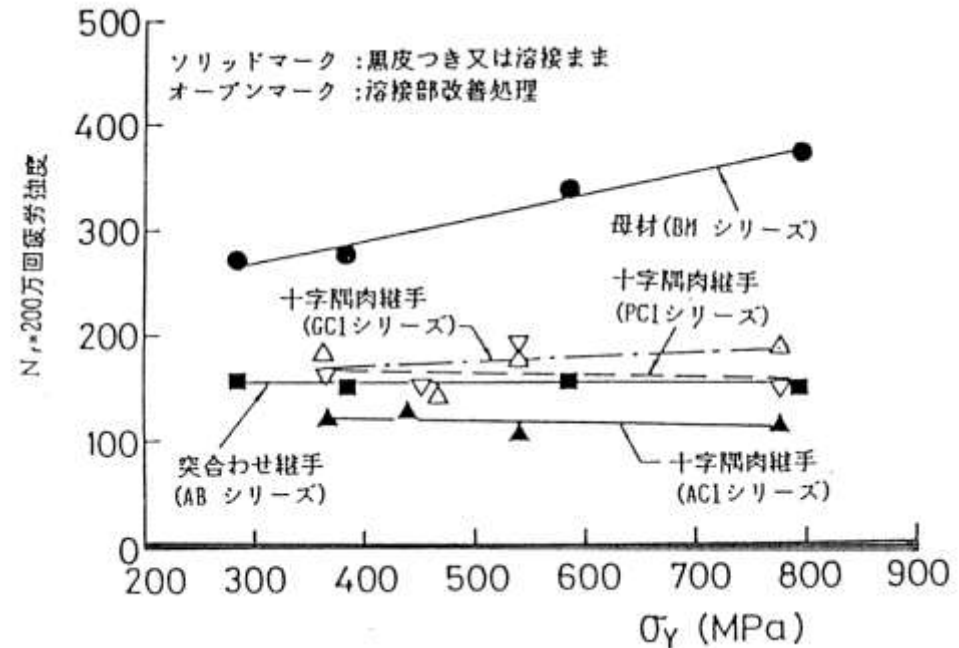
# 疲労強度の常識

## 母材の疲労強度



引張強度の向上により  
疲労強度は改善

## 溶接継手の疲労強度



母材による継手疲労強度  
は改善は困難？

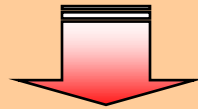
# FCA鋼とは

## 特徴

- ①溶接部の疲労強度の向上
- ②母材部の疲労き裂進展速度の半減
- ③機械的特性、溶接性などは従来鋼と同等以上

## 効果

- ①溶接部からの疲労損傷(き裂)の発生を抑制
- ②万一、疲労き裂が発生しても、その後の疲労損傷の拡大を抑制



溶接構造部物の疲労寿命の大幅向上

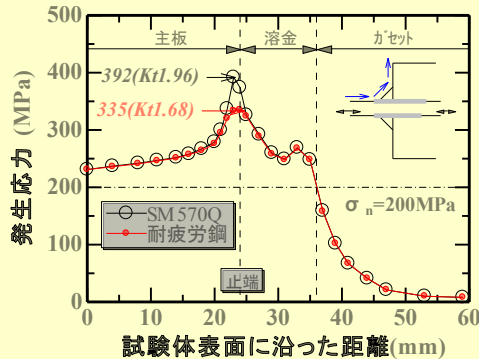
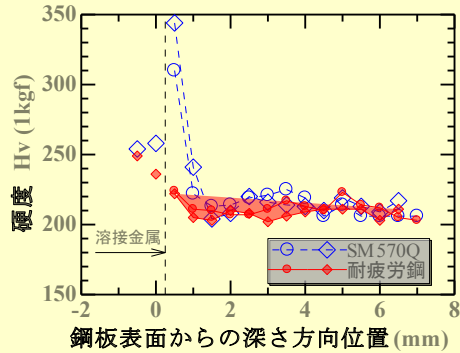
## 適用状況

- ①NK殿など4船級から鋼種認定を取得
- ②NK殿からディスクリプティブノートに記載
- ③120隻以上に採用

# 継手疲労強度向上

## 疲労特性改善の原理(発生特性)

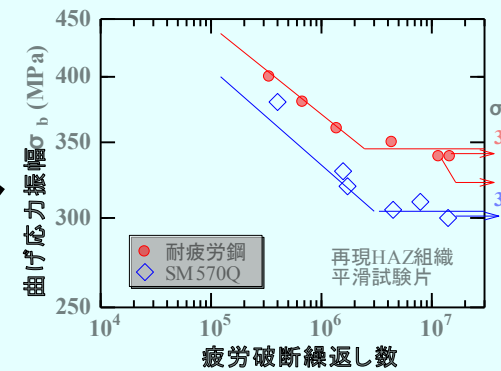
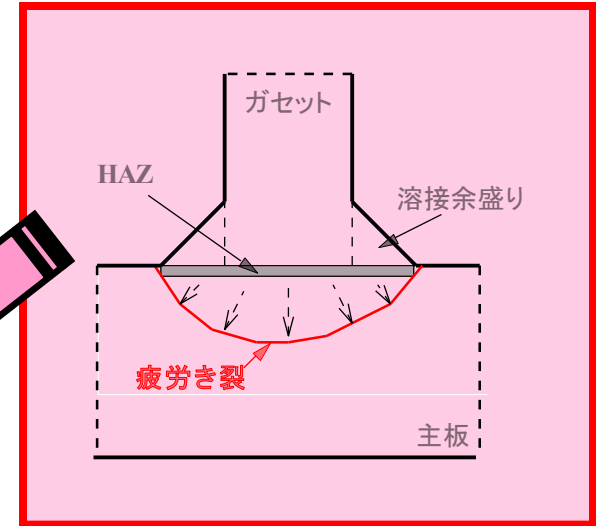
適切な化学成分とフェライト-ベイナイトの混合組織は疲労き裂の発生を抑制する。



平坦な  
硬度分布

母材の疲労  
き裂進展特性

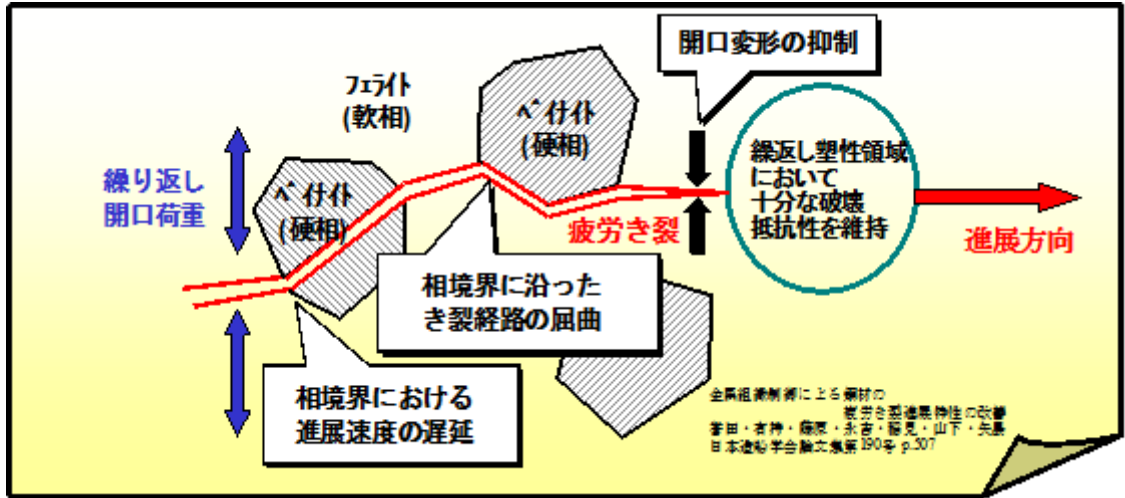
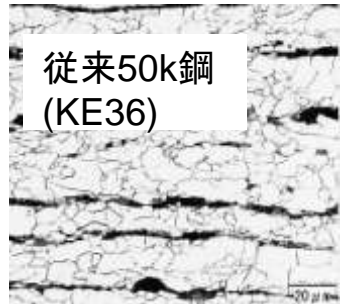
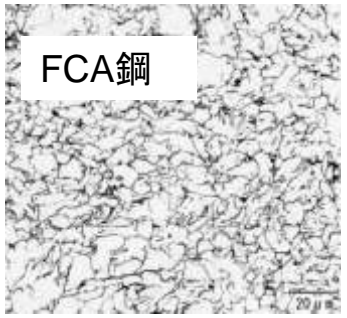
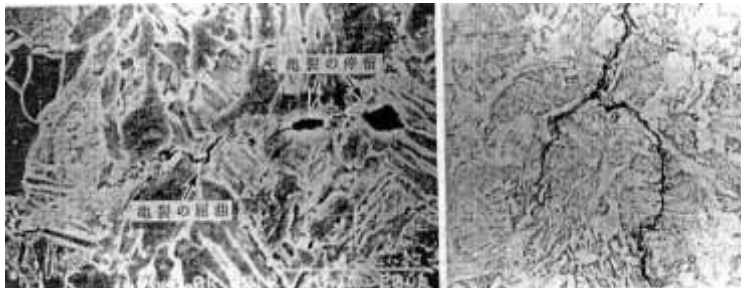
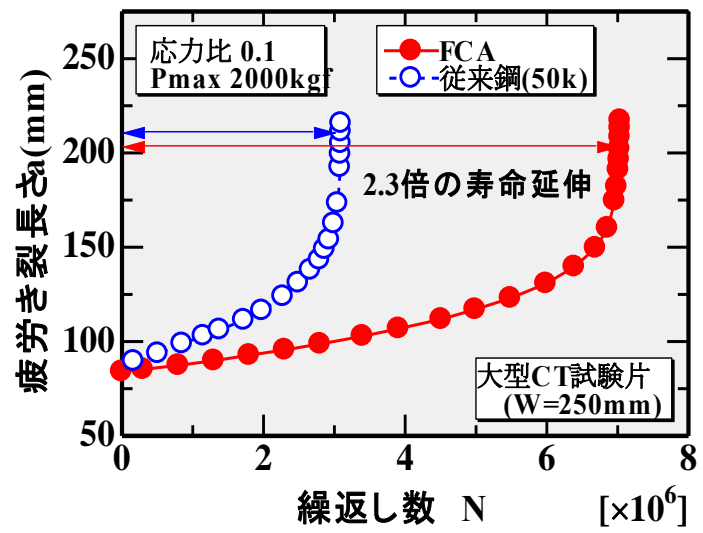
HAZ組織の  
疲労強度



# 母材疲労き裂進展速度抑制

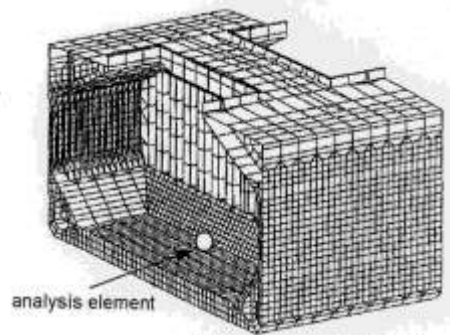
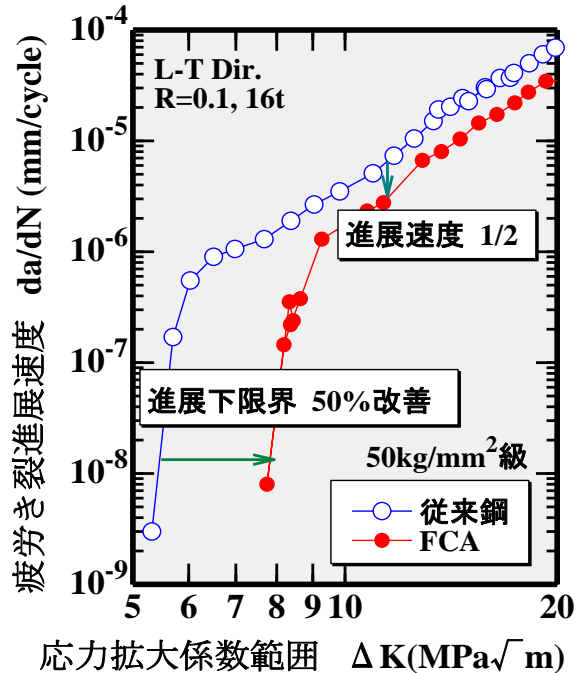
## 疲労特性改善の原理(進展特性)

適切なフェライトとベイナイトの混合組織が疲労き裂経路を屈曲、あるいは進展を一時的に停留させる。

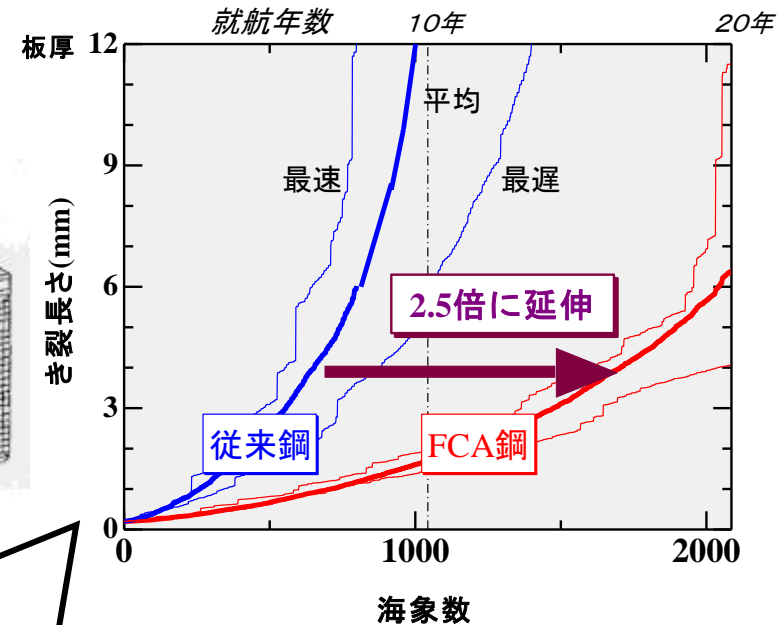


# 母材疲労き裂進展速度抑制と嵐モデルによる解析

## 母材疲労き裂進展試験



## 嵐モデル(阪大・大沢教授ら)による 寿命解析結果例



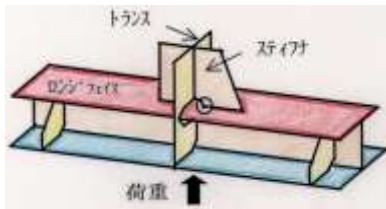
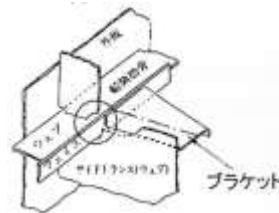
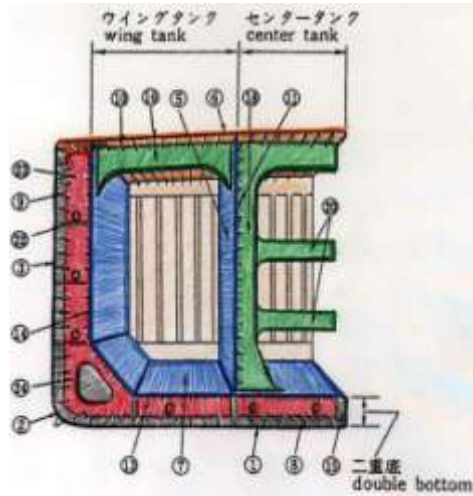
初期き裂を想定し、船体を受ける様々な波浪荷重を忠実に考慮した嵐モデル解析によって、FCA鋼を船舶に適用した時の顕著な優位性を確認。



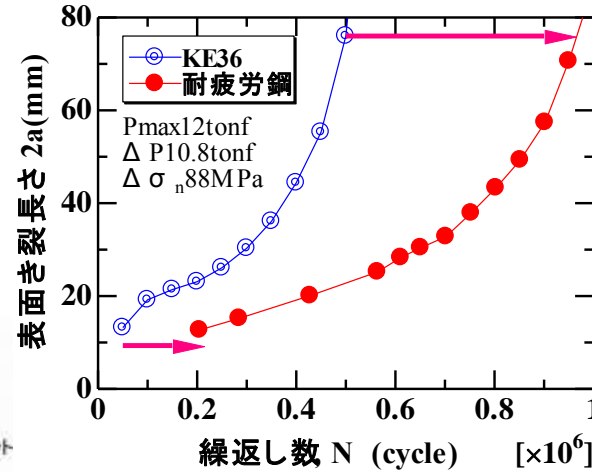
# 大型構造物試験

## 船体構造モデルの疲労試験結果例 (NK材料認定時実施試験)

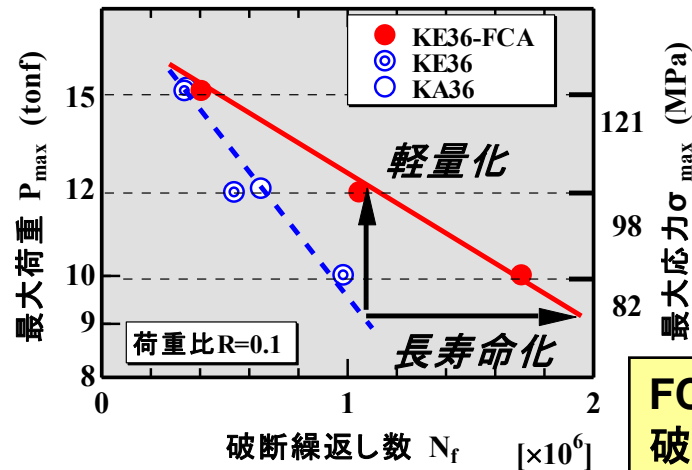
### 溶接継手の疲労特性



### スティフナー付きサイドロンジ 溶接構造体モデル

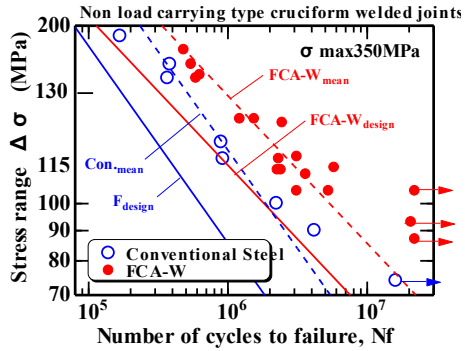


FCA鋼の適用で疲労き裂の発生・成長を抑制可。



FCA鋼適用により疲労破断寿命の延伸が可能

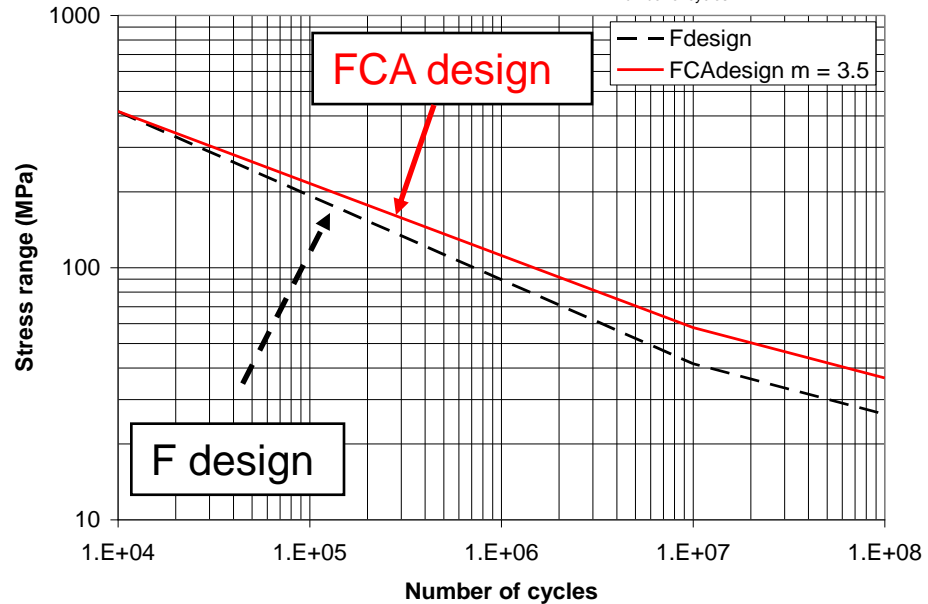
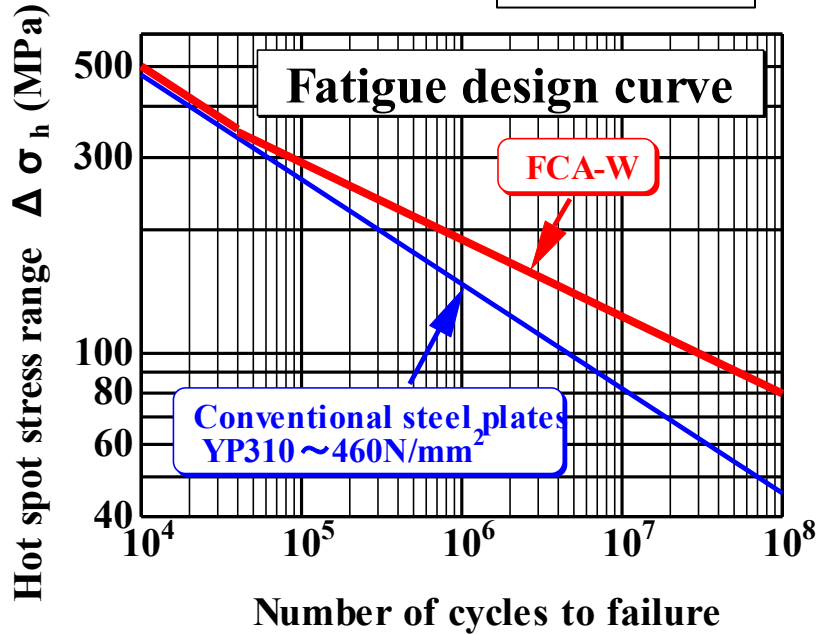
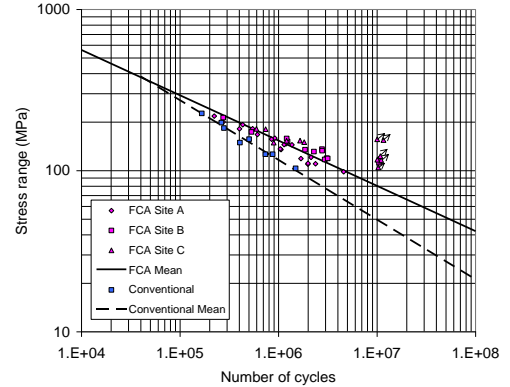
# FCA鋼の疲労設計S-N線図(船級が策定)



荷重非伝達十字継手による  
試験結果から船級協会が  
疲労設計S-N線図を策定

Class NK

DNV

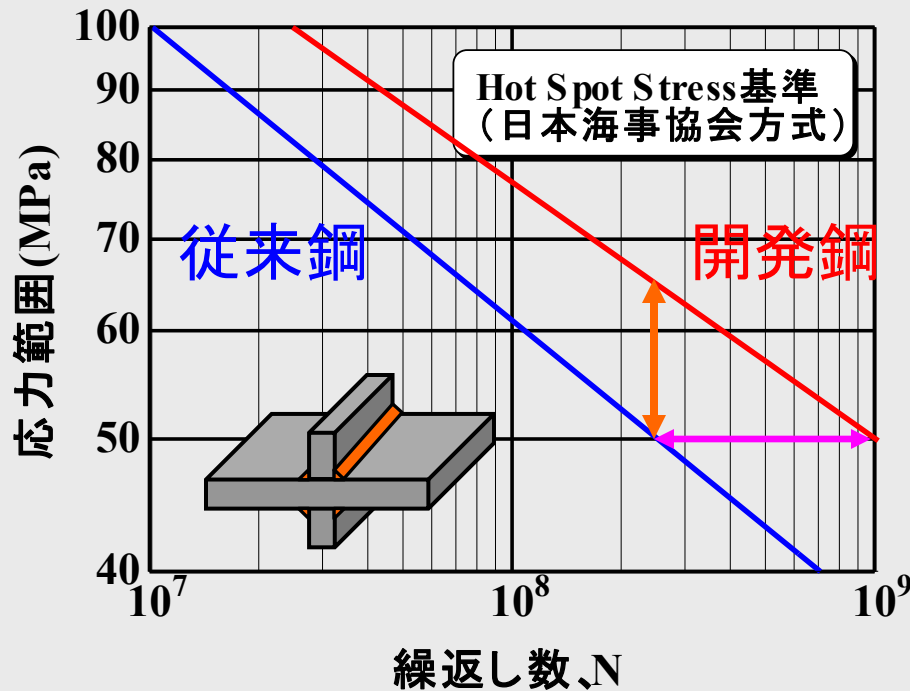


本S-N線図を個々に適用するには、改めて船級協会との協議、試験等が必要になります

# 継手疲労設計への反映

継手疲労設計の変更(世界初)

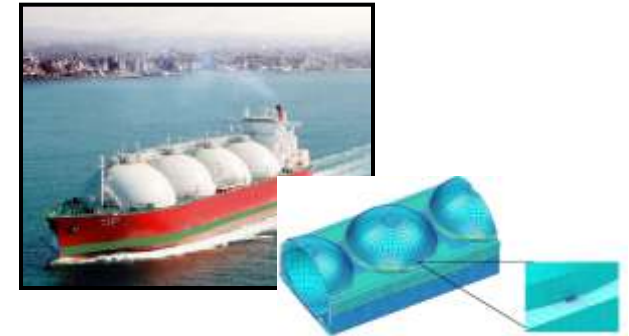
2重のバリアの効果として



日本海事協会から認定取得

国内の状況

LNG船



タンクカバー; 32年 → 60年  
施主要求の50年を始めて達成

許容応力が 1.3倍上昇

疲労寿命が 4倍延伸

# FCA鋼の疲労特性以外の特性

## FCA鋼のその他の特性

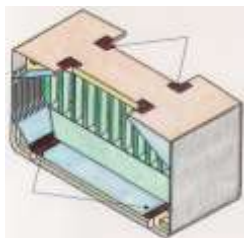
### 従来鋼との比較項目および比較結果一覧

評価項目	比較結果
降伏応力	従来鋼より僅かに高め
引張強度	従来鋼より僅かに高め
母材シャルピー	従来鋼と同等
溶接部シャルピー	従来鋼と同等
溶接性	従来鋼と同等以上
耐食性	従来鋼と同等以上
線状加熱特性	従来鋼と同等
曲げ特性	従来鋼と同等

# FCA鋼適用事例

## FCA鋼の実用化状況

FCA鋼を適用した船舶には特別の称号を獲得したものあり。  
長期間に渡る商品価値維持に貢献。



NIPPON KAIJI KYOKAI 1st Number 9290890  
PROVISIONAL  
CERTIFICATE OF CLASSIFICATION

Ship's Name SOUTHERN WISDOM Classification Number 042E90  
Registered Gross Tonnage 88,548 Official Number 32460-TJ  
Owner Fair Wind Navigation S.A.  
Port of Registry Panama Flag Panama When Built September 2004  
Builder Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. Ohta Works  
Where Built Ichihara, Japan

THIS IS TO CERTIFY THAT the above ship having been surveyed for classification on 7 September 2004 in accordance with the Society's Rules and Regulations and reported by the Surveyors to be fit for classification, has been entered provisionally in the Classification Register with the under-mentioned Classification Character(s).

Classification Character(s): NS\* (Bulk Carrier) (SPS)  
NS\*

Descriptive Note(s): (Strengthened for heavy cargo loading where hold nos. 2, 4, 6 & 8 may be empty)  
(Fatigue crack arrestor applied to hatch corners of all cargo holds and bilge hopper knuckle of No. 4 cargo hold)

This Certificate is valid until 4 February 2005 subject to continued compliance with the Society's Rules and Regulations. However, the certificate shall become invalid upon issuance of the CERTIFICATE OF CLASSIFICATION.

Date of Issue 7 September 2004  
Place of Issue Tokyo  
See notes in the register

NIPPON KAIJI KYOKAI  
(In Japanese)  
General Manager of Tokyo Branch

意義 船級(NK殿)が船舶疲労破壊に対する安全性を認定(世界で初)  
効果 船級より特別な船級符号が与えられ、船舶の高付加価値を証明  
対象 三井造船(千葉)殿製造のバルクキャリアー  
「サザン ウィズダム」号 総トン数88,548トン

Descriptive  
Note(s):

(Strengthened for heavy cargo loading where hold nos. 2, 4, 6 & 8 may be empty)  
(Fatigue crack arrestor applied to hatch corners of all cargo holds and bilge hopper knuckle of No. 4 cargo hold)

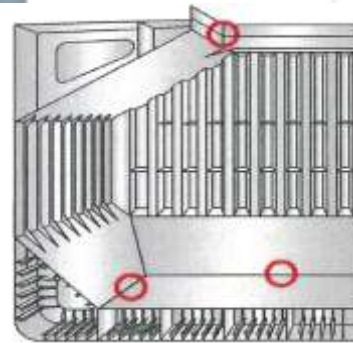


# FCA鋼適用部位

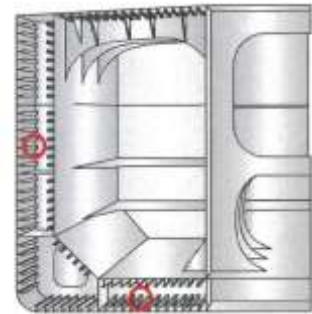
## FCA鋼の実用化状況

多数の造船所、船舶の多くの形式に適用済み。  
既に、120隻以上で活用されている。適材適所。

### ●貨物船



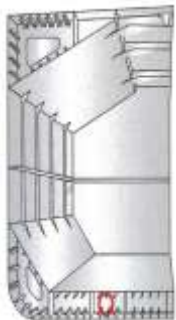
### ●超大型原油タンカー



### ●自動車専用運搬船



### ●液化プロパンガス船



# FCA®の特長まとめ

- 1) 母材の疲労き裂進展速度が抑制 (従来鋼の約50%の速度)  
更に $\Delta K_{th}$  (進展下限界)が改善 (従来鋼の約50%改善)
- 2) 継手の疲労強度が向上できる  
継手疲労設計S-N線図が材料だけで変更可能
- 3) 溶接等の施工性も従来鋼と同等またはそれ以上
- 4) 船舶の疲労寿命延伸、軽量化に貢献できる



# 1. 耐腐食鋼(原油タンカー塗装代替)

**NSGP<sup>®</sup>** : Nippon Steel & Sumitomo Metal Green Protect

# 2. 耐疲労鋼(継手疲労強度、疲労き裂進展特性向上)

**FCA<sup>®</sup>** : Fatigue Crack Arrester

# 3. 耐脆性破壊

(脆性破壊伝播停止特性に優れた鋼材)

# 大型コンテナ船の鋼材の動向

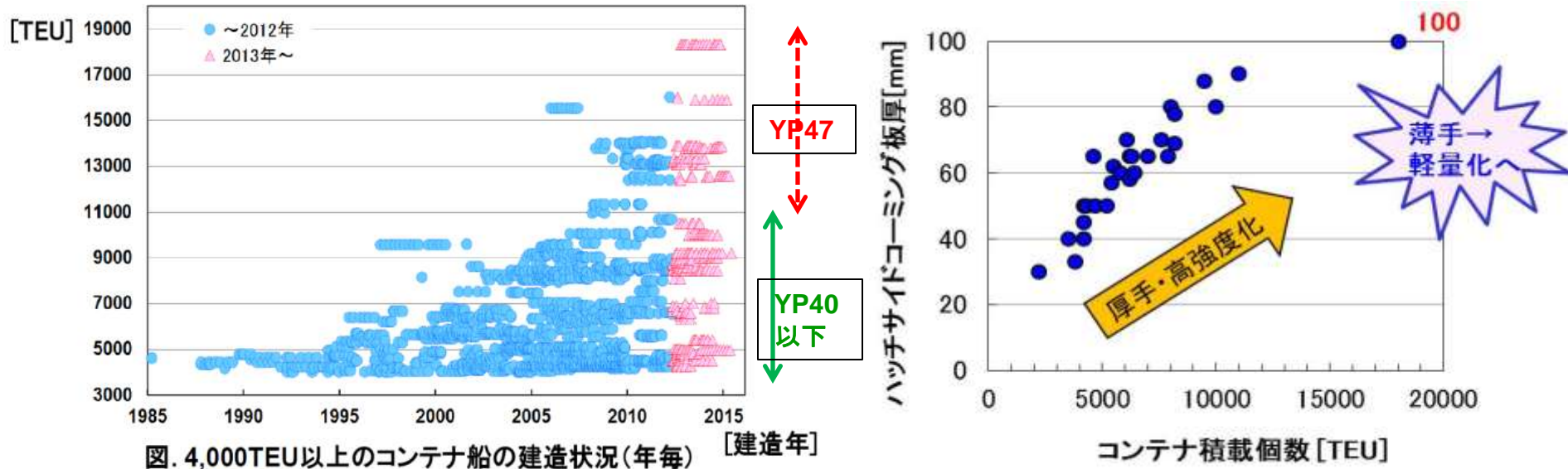


図. 4,000TEU以上のコンテナ船の建造状況(年毎) [建造年]

コンテナ船の急激な大型化



船体構造の極厚化・高強度化

極厚鋼板溶接継手の脆性破壊に関する問題提起 (船舶海洋工学会FS委員会)



NK主導(NK:脆性亀裂アレスト設計委員会の共同研究成果等活用)

IACS UR S33の制定により大型コンテナ船にアレスト設計が義務化

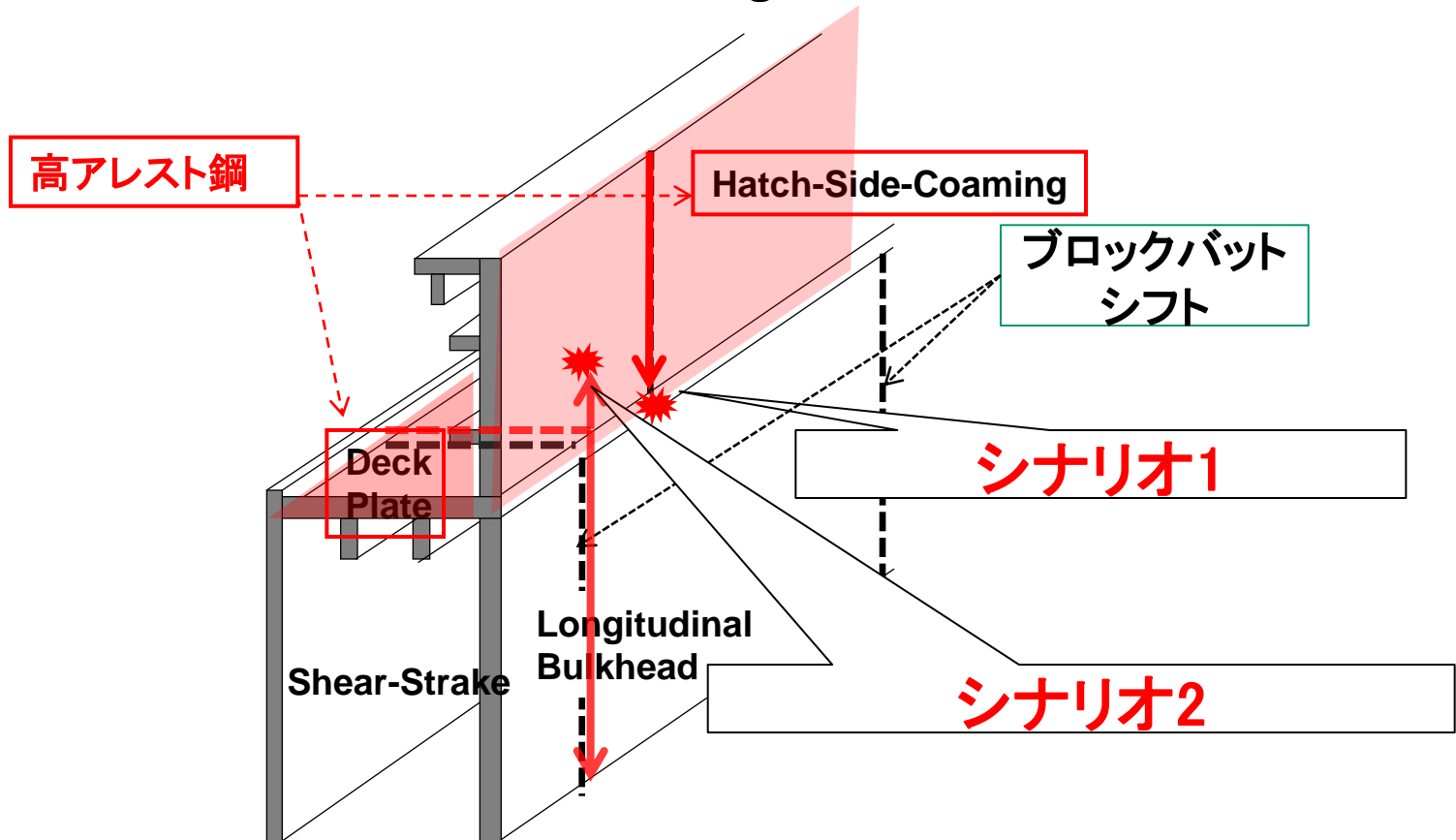
IACS UR W31にてYP47鋼の適用要件制定

高アレスト鋼材の要求(板厚 $\leq 80\text{mm}$ 、 $Kca \geq 6000\text{N/mm}^{3/2} @ -10^\circ\text{C}$ )  
板厚80mmを超え100mm以下に関しては各船級による

# 脆性破壊伝播防止のシナリオ

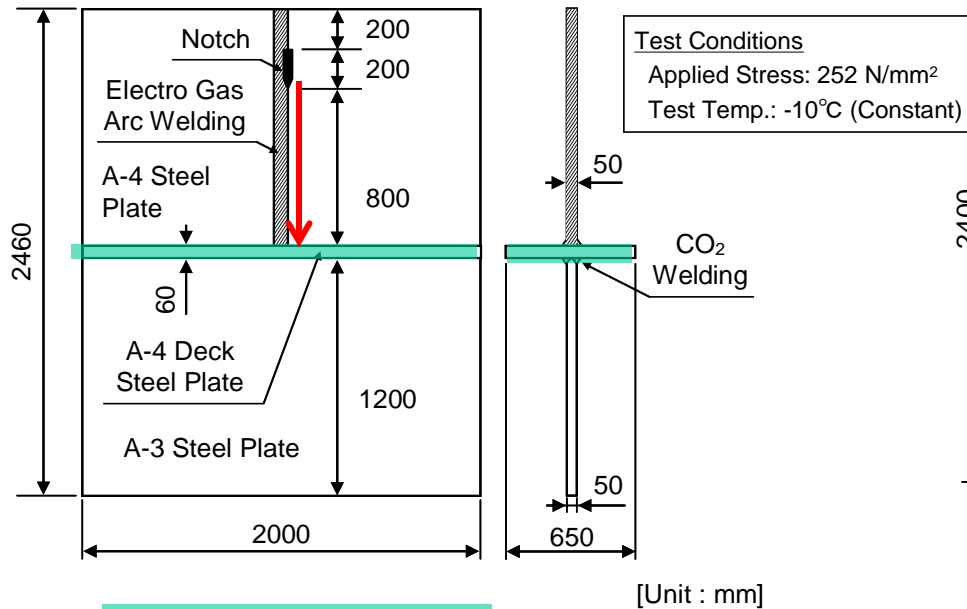
高アレスト鋼を Hatch-Side-Coaming と Deck Plate に適用

- ・シナリオ1: Hatch-Side-Coamingで発生した脆性き裂をDeck Plateで止める
- ・シナリオ2: Deck Plate (Shear-Strake, Longitudinal Bulkhead)で発生した脆性き裂をHatch-Side-Coamingで止める

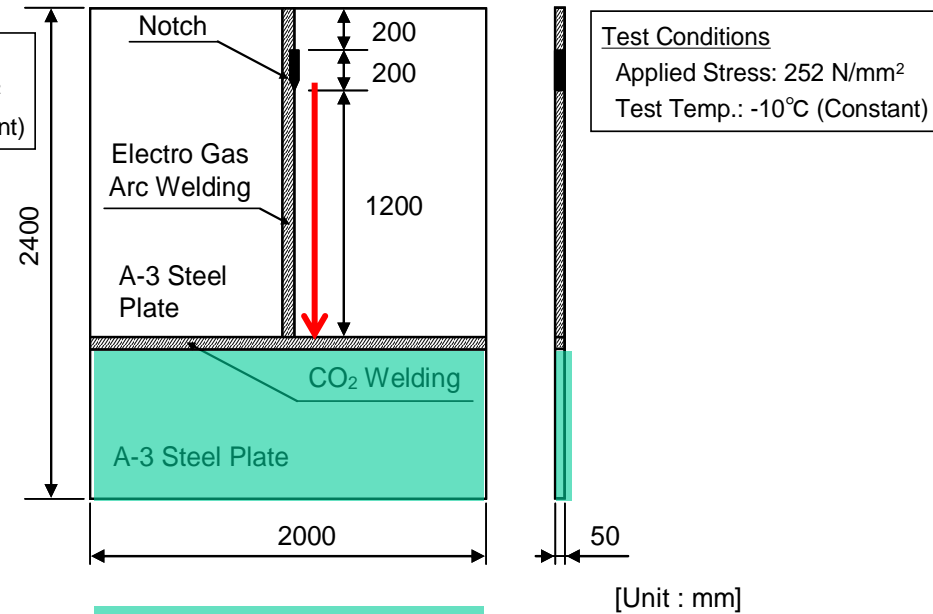


# シナリオ1, 2の試験片形状(大型ESSO試験)

シナリオ1

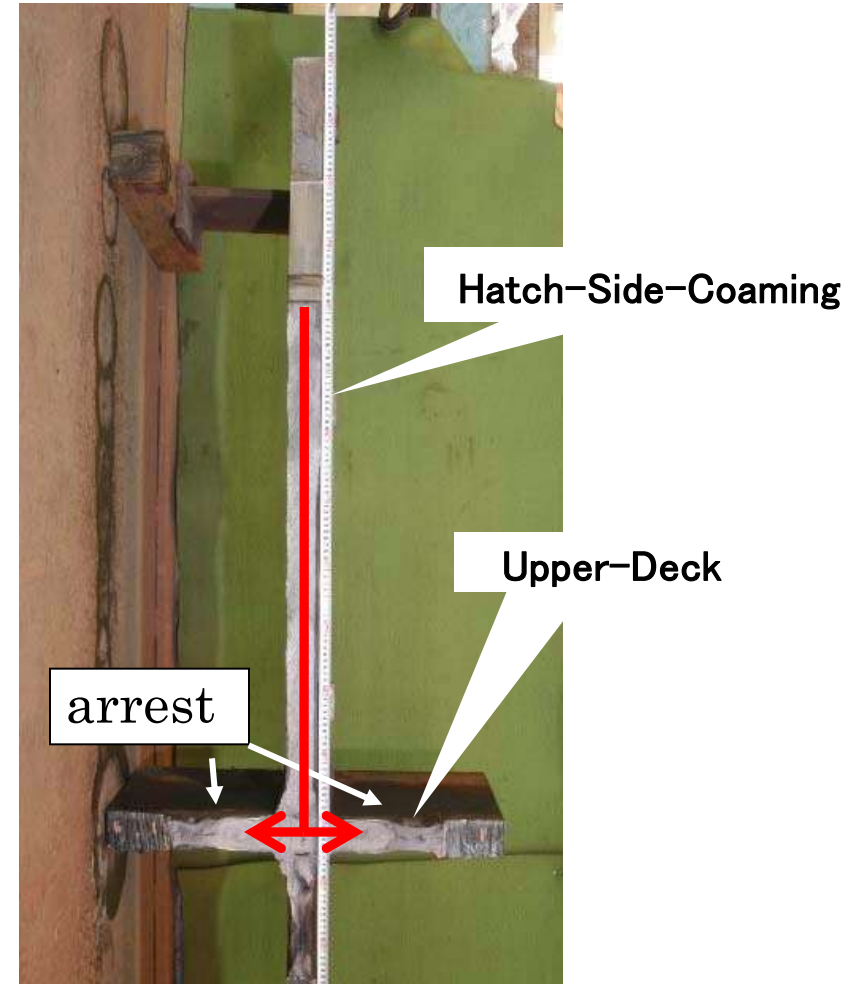
試験板  
(EH40)

シナリオ2

試験板  
(EH47)

# 脆性き裂伝播経路と破面 シナリオ1

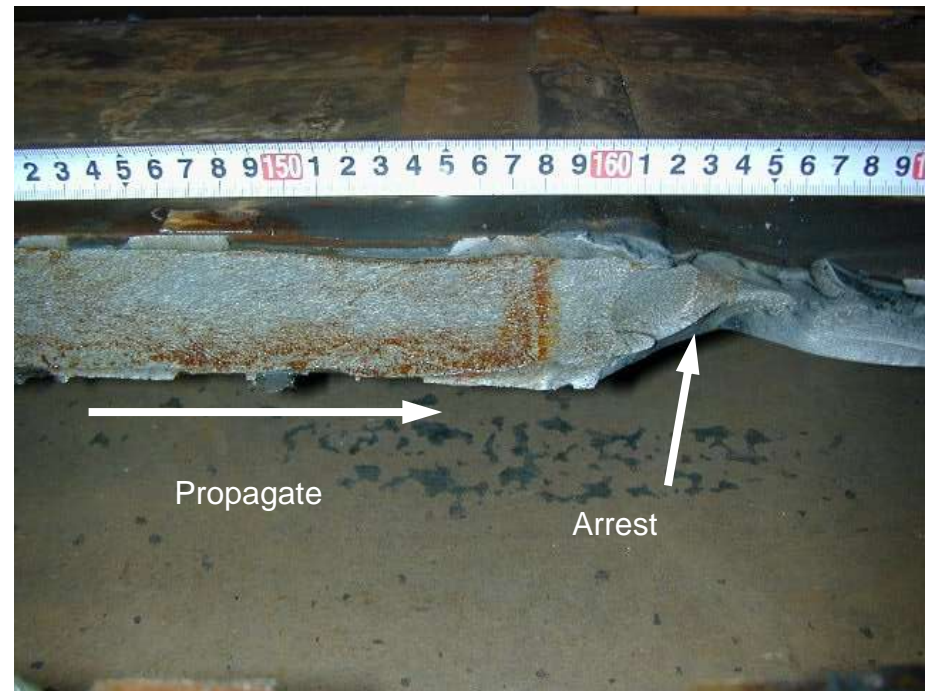
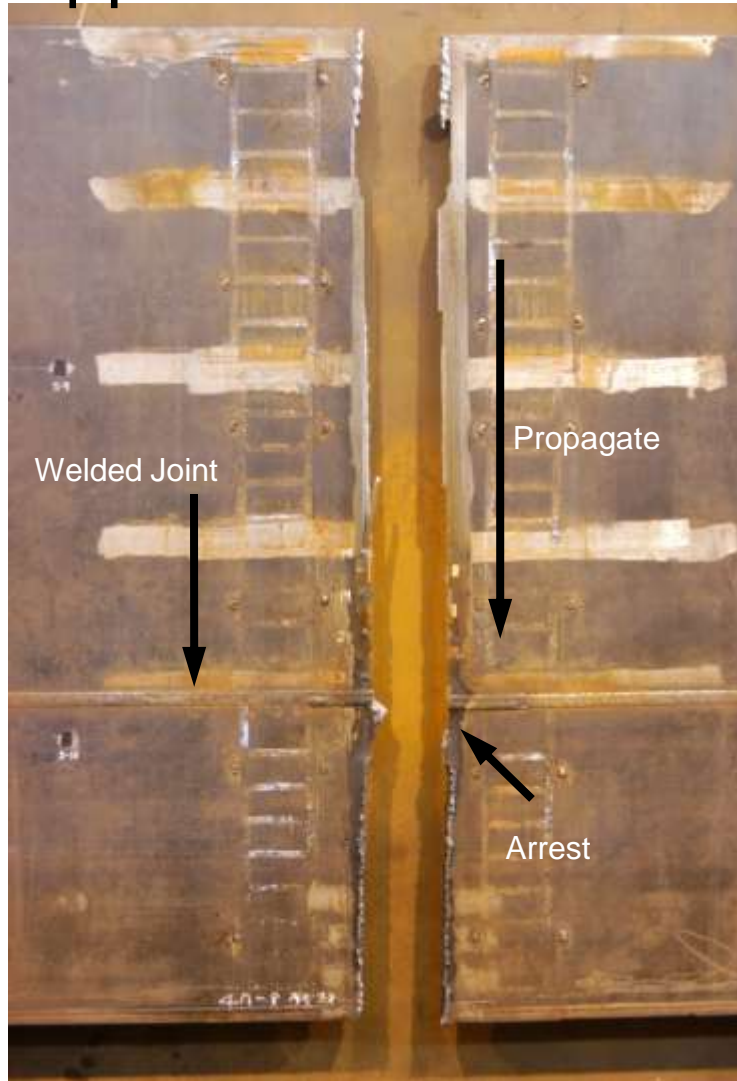
## Hatch-Side-Coaming to Upper-Deck





# 脆性き裂伝播経路と破面 シナリオ2

## Upper-Deck to Hatch-Side-Coaming



# 高アレスト鋼の特長まとめ

- 1) 高アレスト鋼 (EH40, EH47) は IACS UR S33 の規定  $K_{ca} \geq 6000 \text{N/mm}^{3/2} @ -10^\circ\text{C}$  を満足
- 2) 大型の ESSO 試験 (シナリオ 1 & 2) で脆性き裂を停止できることを確認
- 2) 大型コンテナ船の安全性確保に寄与