

鉄と鋼の橋の発展と歴史 DEVELOPMENT AND HISTORY OF STEEL BRIDGES

- Japan-Brazil Memorial Symposium on Science and Technology for the Celebration of 100 years of Japanese Immigration in Brazil (Jun 23, 2008) (ブラジル日本人移民100周年記念理工学シンポジウム)

- (財)大阪地域計画研究所 理事長
 - 京都大学名誉教授

- 渡邊英一

橋梁界は生き残れるか？

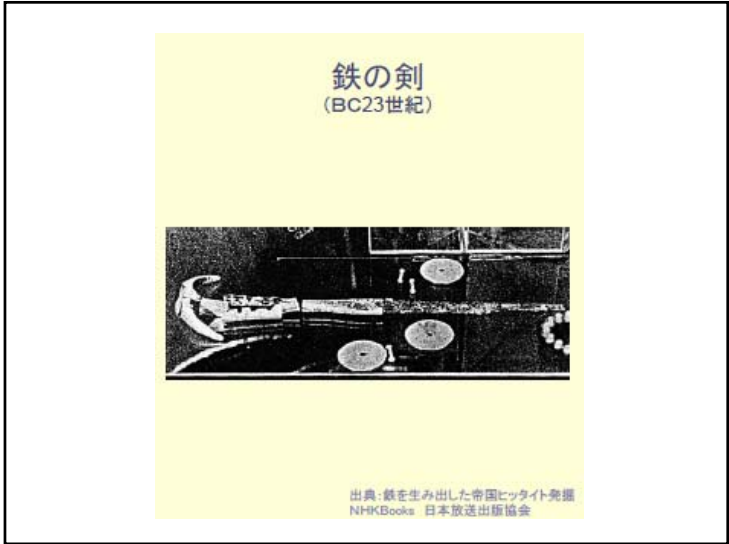
- 現在日本では「箱もの」に対する批判が空前絶後に高まっている。
- インフラは要らないと多くの人が公言している。
- 私は橋は人類の掛け替えのない資産と考える。
- そこで橋の持つ素晴らしさを鉄の歴史をとおして見つめ直そうと思う。

INTRODUCTION: 鉄の素晴らしさ

- 長い歴史の中で信頼性のある材料である
- 延性・強度・剛性・溶接性に富む
- 適正な価額
- 再生・リサイクルが可能

INTRODUCTION: 鉄の素晴らしさ

- Although in our highly advanced world of advanced materials such as carbon nanotubes and carbon fiber reinforced plastics nothing else but steel can be considered as the king of industrial materials. 数あるハイテク材料と較べても優れた材料である。
- As a matter of fact, iron weapons proved to be superb when the Hittite battled with Egyptians. ヒッタイト人の優れた武器はエジプト人を翻弄した。



INTRODUCTION: 鉄の素晴らしさ

- Iron was one of the leading characters of the industrial materials at the **Industrial Revolution** and from this time point, various iron bridges made the remarkable appearances to the world. **産業革命の主役**
- The desirable steel properties of outstanding ductility and strength contributed significantly to the arrival of the ages of large span bridges to conquer **the battle against the gravity**. **重力との闘いの主役**

鉄の歴史

B.C.3500 頃	銅の利用	1909	ジュラルミンの工業化
B.C.3500 頃	中央アジア 鉄の使用	1914	金属アーク溶接法(日)
B.C.3000 頃	ピラミッド建設に鉄片を使用	1914	ステンレス鋼の開発
B.C.1500 頃	鉄器文化(ヒッタイト) 農機具、武器	1920 頃	建築構造に溶接の使用開始
B.C. 800 頃	中国 鉄鉄器物の発明	1921	H 型鋼の生産
300 頃	古代エジプトの錬金術	1924	アルマイトの発明
638	日本で青銅鏡の鋳造	1926	全溶接建築構造建設
752	奈良の大仏	1933	耐熱性鋼コルシコ鋼開発
800	日本刀の製造技術が完成	1952	アルミニウム性サッシと手すりの使用=日本相互銀行本店
897	中国:コークスによる精錬法	1952	鉄筋のガス圧接技術
1300 頃	高炉法による製鉄技術	1952	高強度鋼T1鋼の開発(USSteel SM58)
15 世紀	高炉法による鉄の製造(独)	1954	高力ボルト接合開始
1709	デービー・コークス高炉の完成	1954	圧縮H型鋼製造開始
1753	ハンツマン:るつぼ炉による溶鉱の製造(英)	1955	軽量鉄骨生産開始 軽量冷間型鋼
1775	バドル製鋼法の発明(英)	1958	耐熱性鋼板(日)
1783	鉄の圧延法開発	1962	アルミニウムカーテンウォール
1825	アルミニウムの製造に成功(デンマーク)	1962	H型鋼国産化
1831	L 型鋼の生産開始(英)	1964	高力ボルト JIS 制定・標準H型鋼開発
1855	錬鉄造 万国博覧会に出品	1966	H型鋼 JIS 制定
1856	ベッセマー 転炉製鋼法の発明(英)	1967	SM50 基準制定
1864	マルティン:平炉製鋼法の発明(仏)	1972	ユニバーサル成形ボックス柱開発
1879	トマス:塩基性転炉の開発(英)=近代製鋼法	1988	耐火鋼材 FR 鋼 600 °C で降伏強度 2/3
1885	マンネスマン:鋼管の製造開始	1988	FR(Fire Resistant Steel)鋼 600 °C で降伏強度 2/3
1886	アルミニウムの電解法	1988	New RC Project TMCP(Termo Mechanical Contorol Process) SM570
1901	八幡製鉄所操業開始	1988	NEW RC プロジェクト SD685 の開発
1904	炭素アーク溶接法(日)	1994	ウルボン鋼 引張強度 13000kg/cm2
1908	ガス溶接(日)		

INTRODUCTION: 鉄の短所

- Steel may corrode quite easily if care is not taken. **錆びやすい**
- It is quite heavy. **重たい**
- It takes a lot of energy and fuel when it is produced. **製造は地球環境に重大な影響**
- It may lack in the warm touch of feeling as compared with wood. **木材のような暖かい肌触りは無い**

INTRODUCTION: 一見不思議!

- It is really amazing to know that steel structures are considered to be much lighter than concrete structures. コンクリートより軽い?
- The average people may not understand this and think illogical since the specific weight of iron is 7.85 and that of concrete is something like 2.4. 鉄の比重はコンクリートより高い
- How on earth steel structures can be considered to be much lighter than concrete structures if this difference of specific weight is taken into account? それなのに何故?

INTRODUCTION: 鋼の特徴

- In spite of much heavier specific weight, the steel results in much lighter structures than concrete structures thanks to much **higher rigidity and stronger strength and easiness of forming cross sectional shape** to compensate. 高剛性、高強度、成型が容易

INTRODUCTION: 鋼の特徴

- The **structural lightness** can be fully utilized when urban viaducts are built in big cities.
- Basically, big cities with some exceptions rest on soft basins. **The soil of the basin can not withstand large weight** because it undergoes the settlement and consolidations if any countermeasure is not taken.
- That is why in big cities like Tokyo and Osaka, **the expressway viaducts are made of steel.**

INTRODUCTION: 鋼の特徴

- With the evolution of the steel material for better ductility and strength, large span bridges have been built in the world until the present time. 大スパン橋化可能
- Take for example, Akashi Strait Bridge completed in the year of 1998, the maximum span length reached 1991 m.

Akashi Strait Bridge



INTRODUCTION: 鋼の特徴

- One of the key innovations was the strength of the high strength of steel wire cables.
- The strength reached **1800 MPa**, which proves to be much higher than the average strength of carbon steel of say, 400 MPa.
- Without this innovation, the Akashi Strait Bridge should have made a choice of using twin main cable as compared with the existing mono cable.

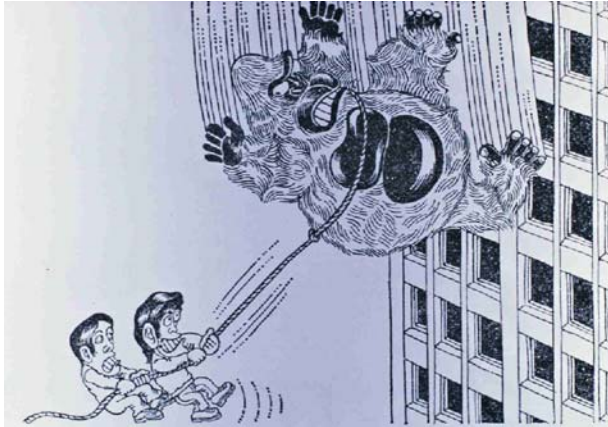
INTRODUCTION: 将来性

- Talking about the future of steel structures, particularly bridges, however, many rooms for improvements are thought to exist.
- First of all, with regard to the construction of super long span bridges, the present concept of bridge design in use of steel can not be applied so easily. Especially, when the span length exceeds **3000 m**.

INTRODUCTION: 将来性

- Bridges have to fight only with **their own weight** and neither external loads such as live vehicle loads nor natural loads such as wind, earthquake and snow load can possibly be carried!
- Many innovative engineers have proposed several revolutionary ideas such as the use of carbon fiber reinforced plastic to replace steel.

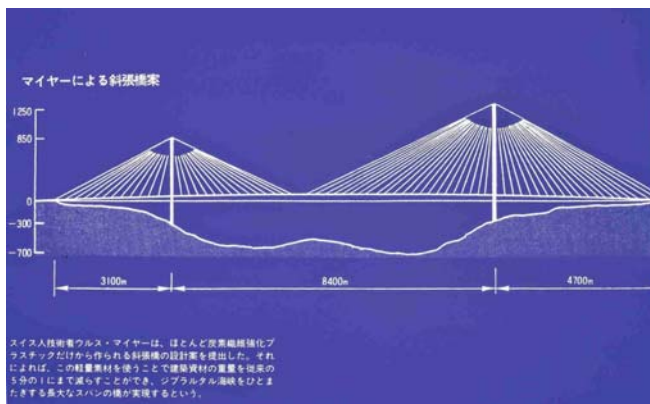
重力との闘い



CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS



CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS



INTRODUCTION: 将来性

- CFRP :much less specific weight, higher strength and higher resistance to corrosion.
- Nevertheless, as compared with the long history of iron and steel over almost 6000 years of experience, this high performance material is lacking in the reliability because of only a very short history of usage.

INTRODUCTION: 将来性

- As the size of structures becomes larger and larger, there would be many hazard or barricade of aerodynamic instability, buckling and long-term durability particularly in the sea.
- Of course one should consider other possibility. It may be too much a stubborn attitude to stick to the philosophy of conquering the gravity of the earth.

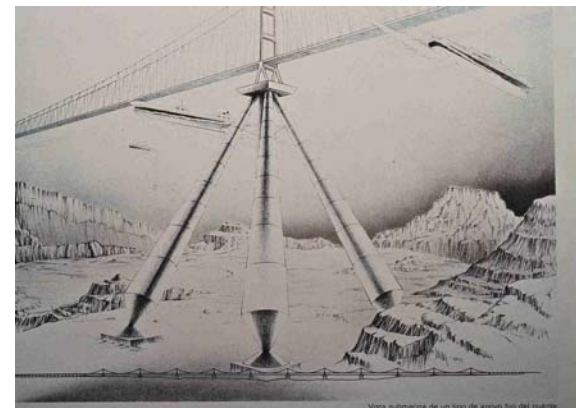
INTRODUCTION: 将来性

- What happens for example to the piers of Gibraltar crossing bridge project where the seabed may be as deep as **900 m**.
- Even if the superstructure could be successfully designed and built using the high performance material such as CFRP, how is it possible to build the piers exceeding one kilometer or so on the economical basis?

大水深



巨大橋脚？



INTRODUCTION: 将来性

- In this regard, the concept of **floating bridges** would become a candidate. Usually the sea water is regarded as barrier to the bridge construction.
- However, in the case of **floating structures**, it can be regarded as if it is an elastic spring providing the buoyancy force.

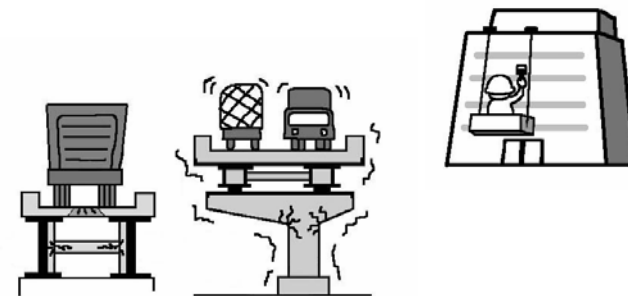
浮力！



INTRODUCTION: 将来性

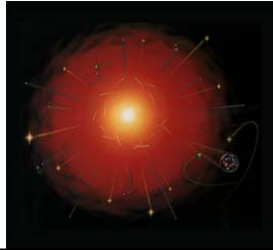
- Lastly, but not the least, people in the present world may not simply enjoy looking at the super long structures.
- They must also consider the priority of investment for other important facilities. Until quite recently the world was moving in the direction of **“use and dispose”**.
- These days however people are realizing the importance of **“sustainable development”** which means positive evolution but great emphasis on **“harmony with the environment”**.

維持管理



鉄の起源

- 137億年前に起きた「ビッグバン」と呼ばれる大爆発で生まれた宇宙は、星の誕生と消滅を繰り返し、進化してきた。鉄の星「地球」が誕生したのは46億年前つまり、ビッグバンから90億年後である。

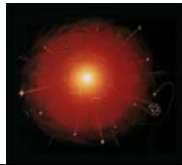


NOVA:超新星

- 鉄は、核融合の最後に誕生するが、太陽程度の大きさでは、核融合が進んでも炭素(陽子6個、中性子6個)や酸素(陽子8個、中性子8個)までの元素しかできない。
- 鉄ができるのは、太陽の約8倍から30倍の大きさの恒星の場合だ。これらの恒星の中心部では、宇宙の時間としては比較的速い3,000万年程度の時間を経て、コンパクトでそれ以上反応が進まない鉄が生まれて、核融合が終わる。しかし、鉄まで核融合が進んだ恒星は、そこで変化が止まるわけではない。

NOVA:超新星

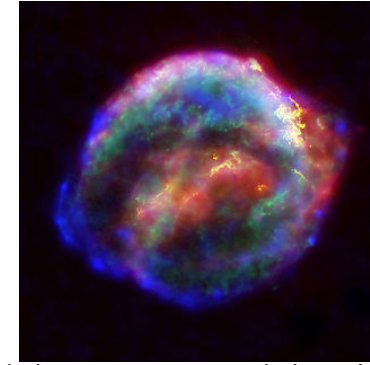
- さらに外からさまざまな原子が引き寄せられ、恒星の中心部では、これまで安定的に存在していた鉄の原子核が崩壊してしまう。
- さらに温度・圧力が高まると、陽子は電子と衝突して中性子に変化し、このときに「ニュートリノ」を放出する。
- 大量に放出されたニュートリノの一部が、外側に存在する原子にぶつかり、大爆発を起こす。これが「超新星爆発」だ。



円盤銀河NGC 4526で観測された超新星: SN 1994D
(左下の光点)



超新星残骸 おうし座のかに星雲。



ケプラーの超新星 (SN 1604) の超新星残骸。[スピッツァー宇宙望遠鏡](#)、[ハッブル宇宙望遠鏡](#)および[チャンドラX線天文台](#)による画像の合成画像。

酸素濃度の上昇と鉄鉱床の形成

- 27億年前から19億年前までいったい何が起こって、なぜ大量の鉄鉱床ができたのか？
- それは、「**光合成細菌の出現**」と関係がある。

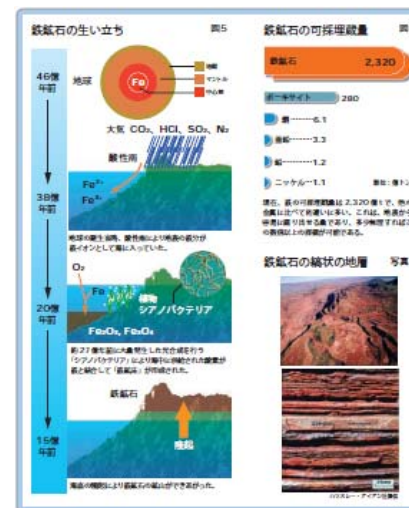
光合成細菌の出現とその後...

- もともと海には大量の鉄がイオンとして溶けていた。さらに当時は現在よりも活発な海底火山活動によって地球内部の鉄が噴出して、常に鉄イオンが海に供給されていた。
- 鉄鉱床が形成され始めたといわれる27億年前は、**シアノバクテリア**や**ストロマトライト**のような光合成細菌が大量発生した時期と一致する。

光合成細菌の出現とその後...

- 光合成細菌は二酸化炭素を原料に炭水化物を合成するが、同時に「産業破棄物」として酸素を放出し、海水中の酸素濃度が徐々に高まった。
- この酸素が海水中に溶けていた鉄イオン(Fe^{2+})と結びつき、酸化鉄 (Fe_2O_3) に変え、沈殿させていった。
- 酸化鉄は世界中の海底に降り続け、海底に厚く沈殿した。
- これを縞状鉄鉱床という。こうして主要な鉄鉱山が形成された。

鉱床

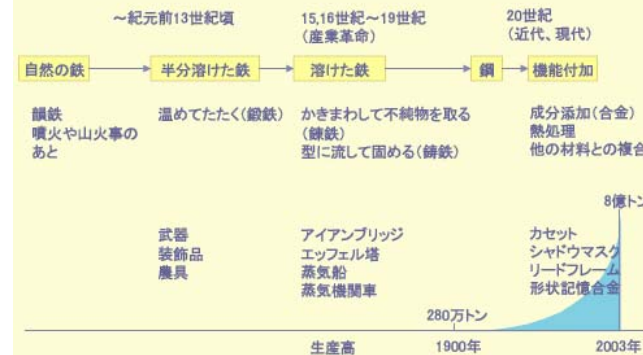


鉄の使用の起源

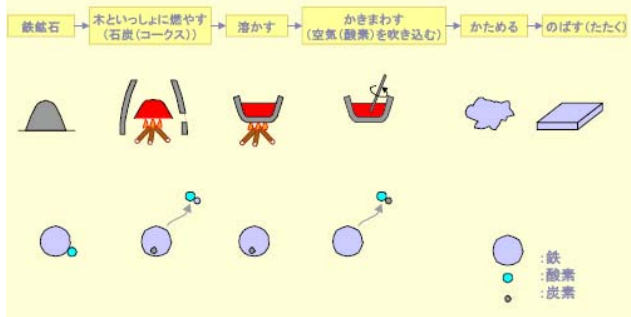
- Hittite BC 3000



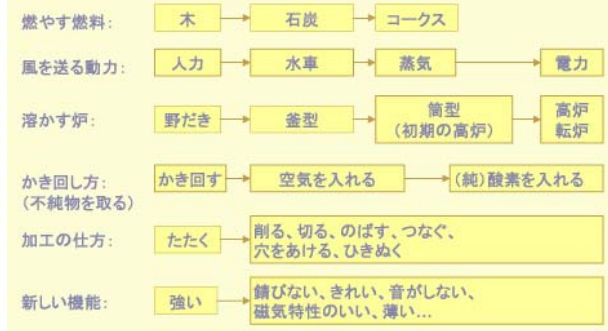
鉄の進歩



鉄の作り方



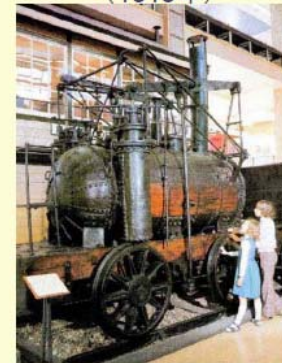
鉄の作り方 周辺の進歩



錬鉄



ワット揚水蒸気機関 (1813年)



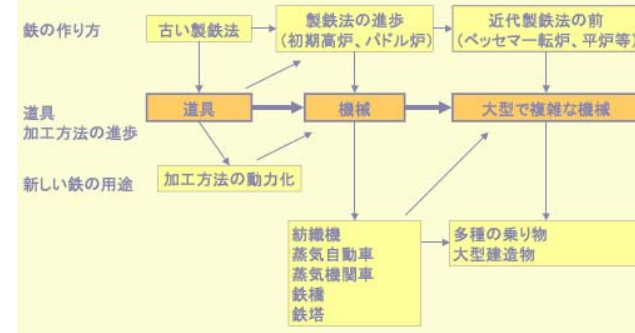
出典:「世界の博物館-8」
ロンドン科学博物館
講談社

蒸気機関車
(1814年)



出典:「世界の博物館-8」ロンドン科学博物館
講談社

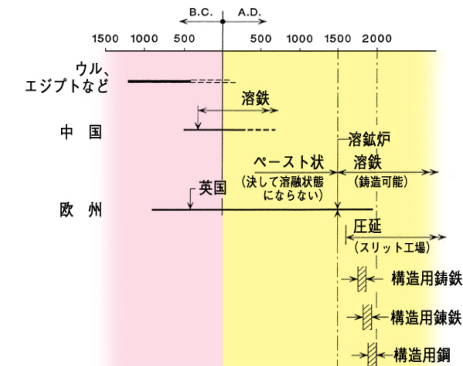
産業革命 (道具から機械へ)



1 鋳鉄・鍛鉄・スチールの強度と炭素含有量

素 材	およその炭素含有量範囲 (%)	終局強度の範囲	
		圧縮 (N/mm ²)	引張り (N/mm ²)
鋳鉄 (ねずみ)	2,25 - 4,0	400 - 1000	100 - 150
鍛鉄	0,02 - 0,05	250 - 400	250 - 400
スチール (溶接可能)	0,2 - 1,0	350 - 700	350 - 700

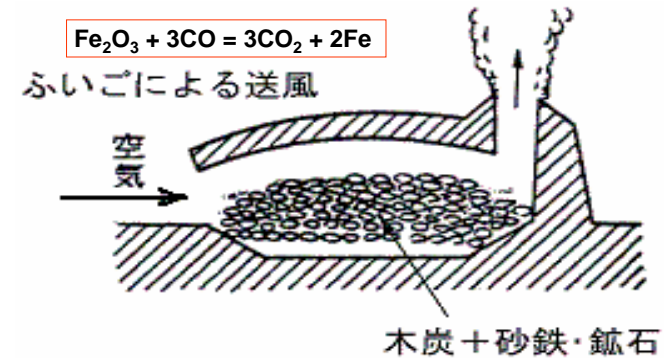
2 BC1500来の鉄・スチール使用の歴史 (構造用には250年前から)



AGES OF CAST IRON, WROUGHT IRON AND STEEL.

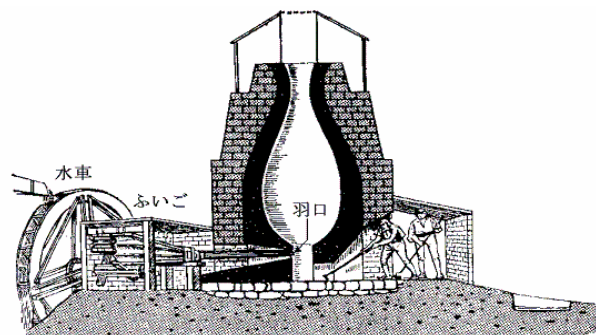
Name of Age	Period
Age of Cast Iron	1780-1850
Age of Wrought Iron	1850-1900
Age of Steel	1880-Present time

原始的な製鉄法



初期の製鉄炉は木炭と鉱石を層状に装入して、ふいごなどで空気を送って燃焼させ、そのとき生じるCOIによって酸化鉄を還元したものと思われる。

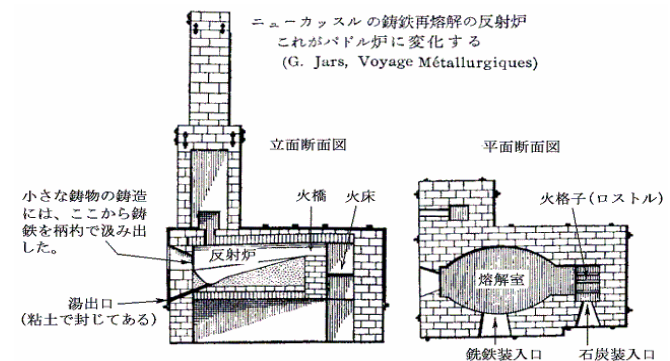
高炉法: (1) 送風への水車の利用



16世紀イギリスの高炉の想定図 (Aitchison, a history of metals, 2, p. 410)

(16世紀の高炉は本体高さ6メートル、日産一トン程度)

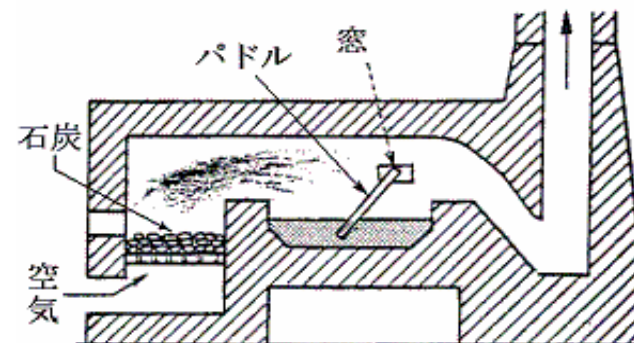
反射炉とパドル法(1783年)



反射炉とパドル法(1783年)

- 18世紀の初めから鑄鉄の鑄造のために反射炉で鑄鉄を再熔解する技術が工業化された。反射炉とは、火床(ロストル)で石炭を焚き、その火焰を火橋を越えてとなりの熔解室に導く。ここを反射熱で高温にして装入された鑄鉄を溶かすものである。石炭を鑄鉄と接することなく燃焼させて石炭の持つ不純物が鉄に混入することを防ぐ優れたアイデアであった。石炭の火力は反射熱で銑鉄(融点1200℃)を溶かすのに十分なほど強力であったから可能になった。

反射炉とパドル法(1783年)



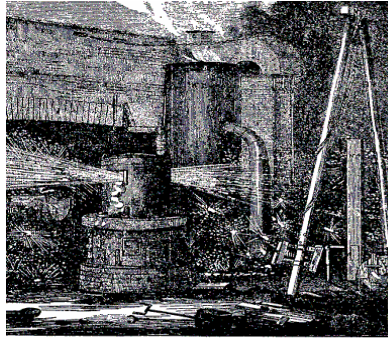
反射炉とパドル法(1783年)

- 1783年:ヘンリー・コートが反射炉で銑鉄を溶解することに成功。
- 石炭の反射熱で銑鉄は熔け、火焰の酸素によって炭素が酸化除去され銑鉄は鍛鉄に変わる。鉄は炭素を失うにつれて溶融点が高くなり流動性を失い自力でそれ以上反応する力を失うので、鉄の棒でぐるぐるかき回す(パドリング)。この過程で銑鉄と石炭は接触しない。

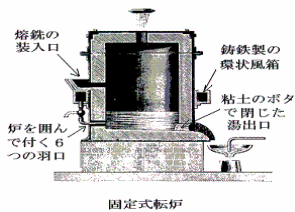
反射炉とパドル法(1783年)

- このとき火焰の中に過剰の酸素を送ると、その酸素で鑄鉄中の炭素や不純物のリン・硫黄を燃焼除去することができる。反射炉を炭素含量を減らして鍛鉄(鋼)を製造するために用いたのが1783年にヘンリー・コートが実用化したパドル法である。パドル(paddle)とはボートを漕ぐのに使う櫂(かい)のことである。

転炉法 (1)ベッセマー転炉(1856年)酸性炉材



最初のベッセマー固定式転炉 (1855年)
普通のキュボラ(中央)、ベッセマー転炉(前方)、
粗製鉄を熔錬炉から精錬室に運ぶ容器(左端)

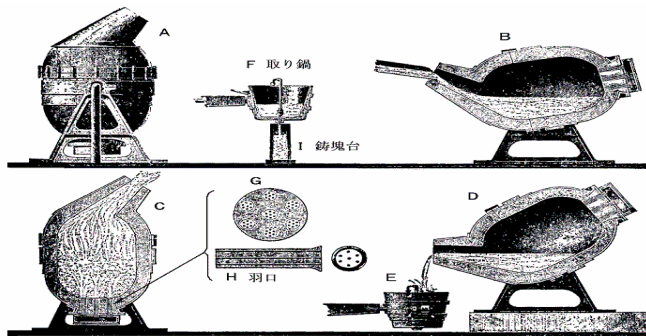


転炉法

(1)ベッセマー転炉(1856年)酸性炉材

- 固定式転炉の欠点は、熔鉄装入中も熔鋼湯出し中も送風をつづけなければならないため、熱の損失が大きいことであった。この対策はまもなくベッセマー自身が見つけた。それは転炉を軸上に乗せて支持し、前後に自由に転倒できるようにする方法であり、こうすれば、熔鉄装入時に“羽口”を熔金面の上方に保つことができる。熔鋼を湯出するときも同じことができるから、ともに送風を中止して作業することが可能となる。こうしてできたベッセマーの可動式(傾注式)転炉は、シュフィールドにある彼自身の所有する製鋼工場で最初に操業されることになった。この新型転炉は、今日にいたるまで、実質上当時とかわらぬ形で存続している。(下図)。

転炉法 (1)ベッセマー転炉(1856年)酸性炉材

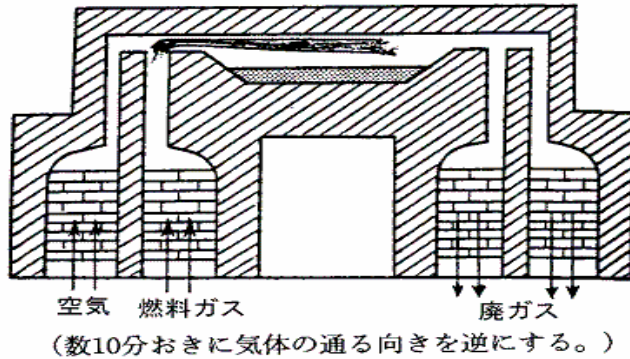


最初のベッセマー傾注式転炉と取りなべの形状(1860年)

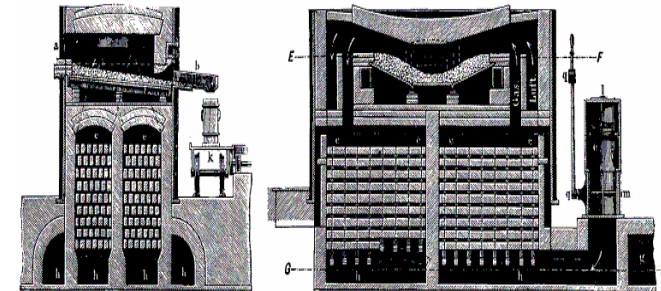
平炉法(1861年)

- 平炉法は1856年ドイツから帰化したイギリス人フレデリック・シーメンスにより考案された。これはパドル法と同様に燃料を用い、反射炉熔解室で鉄の製錬をおこなうが、大きく改良されたところは、炉の廃ガスを用いて加熱した煉瓦の格子積み熱風炉で燃料ガスと空気をあらかじめ予熱しておいて燃焼させる蓄熱室切替法にある(前述のカウパーはシーメンスの協力者で、この原理を高炉に応用したのがカウパーの熱風炉である)。予熱の結果1600℃以上の高温が得られ、熔融状態で脱炭素精錬が可能になった。燃料は石炭をガス化した気体燃料を用いる。

平炉法(1861年)



ほぼ同時期にフランスのマルチン親子により、平炉を用いてくず鉄+銹鉄)による製鋼が試みられた(1865)。このため平炉製鋼法をシーメンズ-マルチン法ともよぶ。

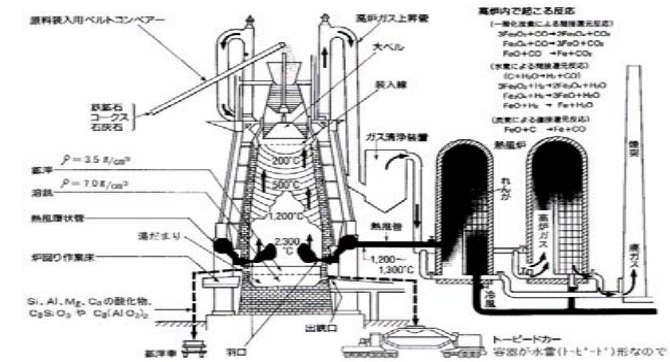


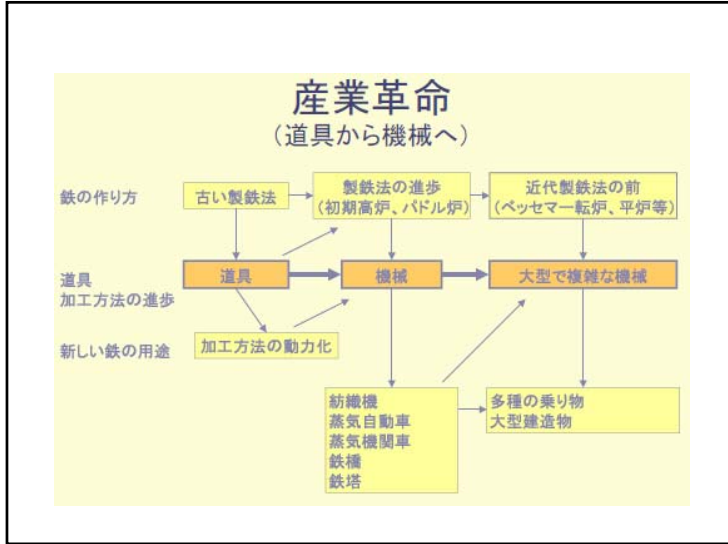
マルチンの使用した最初の平炉
(反射炉の下側に空気とガス燃料の為の蓄熱室が各2室合計4室2列に配置されている)

新しい製鉄技術 (1) 高炉の改良

- 第二次世界大戦後
- [1] 鉄鉱石の整粒・粉鉱の焼結・ペレット化(鉄鉱石と石灰石を焼き固める)などの鉱石事前処理技術の進化。
- [2] 高炉を密閉して炉頂圧力を高めて、上昇ガススピードを遅くする。そして原料と還元ガスとの接触時間を長くしコークス量を節約する。
- [3] 送風の酸素富化・熱風温度の高温化(1200~1300°C)。
- [4] 水蒸気添加による空気中の水分調節。重油、天然ガス、微粉炭燃料の熱風への吹込み。
- [5] 高炉内反応の解析に基づく管理技術の発達
- 等々の技術革新と併に高炉の大型化が進む。炉の形は鉄の熔融物が安定して落下するように経験的にきめられているが、最新の高炉は炉本体の高さが40m、炉底直径は14mにもなり、全体の高さは125mに達する。

新しい製鉄技術 (1) 高炉の改良





Telford, Thomas (1757-1834)

- The English engineer who is well known for the form of road which bears his name. Like others of his contemporaries he was very versatile, and engaged in many branches of engineering. He designed the Menai Suspension Bridge.

Stephenson, Robert (1803-1859)

- He is usually considered the co-inventor of the railway with his father, George Stephenson. His career covered engineering works of magnitude all over the British Empire, but he is best known for his Britannia Bridge over Menai Straits.

Eiffel, Alexandre Gustave (1832-1923)

- The famous French builder of bridges who designed and built the great Eiffel Tower for the French Exposition of 1889 built Garabit Viaduct Bridge. It is thought to be a wonderful masterpiece of his design.

Roebing, John Augustus
(1806-1869)

- The builder of the Brooklyn Bridge as well as those at Cincinnati, Pittsburgh, and Niagara was a Prussian engineer, all of whose great work was done in the United States. The wire from his works was used on the Manhattan, Williamsburg, and 178 Street Bridges in New York.

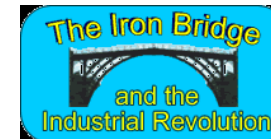
Brunel, Isambard Kingdom
(1806-1859)

- He was the most prodigious engineer in England and achieved many works, which challenged and inspired his colleagues during the period, have survived to our own time and some are still in use. His father, Sir Marc Brunel is also well known as the great civil engineer of the Victorian age. He was the designer of Clifton Bridge which still exists.

COALBROOKDALE



Stonehenge of the Industrial Revolution



Cast Iron

1779



Stonehenge of the Industrial Revolution

Cast Iron

The Iron Bridge and the Industrial Revolution

1779




Stonehenge of the Industrial Revolution


Cast Iron

The Iron Bridge and the Industrial Revolution

1779

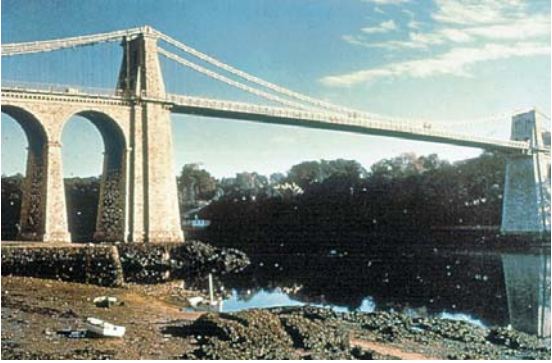


MENAI STRAIT



メナイ海峡チェーン橋
(1819~26年)英国

1826



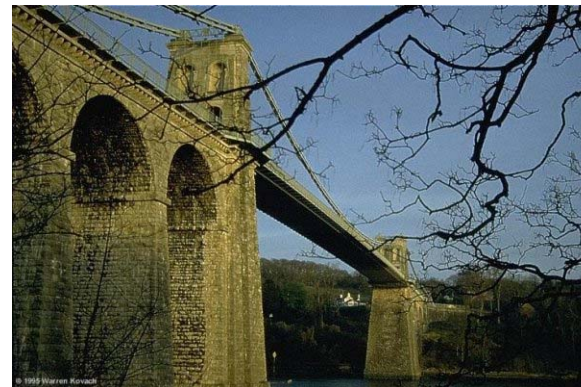
MENAI BRIDGE

1826



MENAI STRAIT BRIDGE

1826



MENAI BRIDGE

1826



長方形管形橋 (a)
(1884年) 英国

[Britannia Bridge](#)

1850



Wrought Iron

Section of the original wrought-iron tubular [Britannia Bridge](#) standing in front of the modern bridge

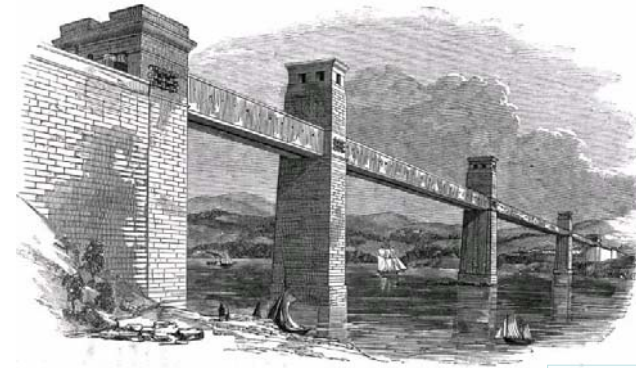


1850

Wrought Iron

The original box section Britannia Bridge, in a circa 1852 illustration

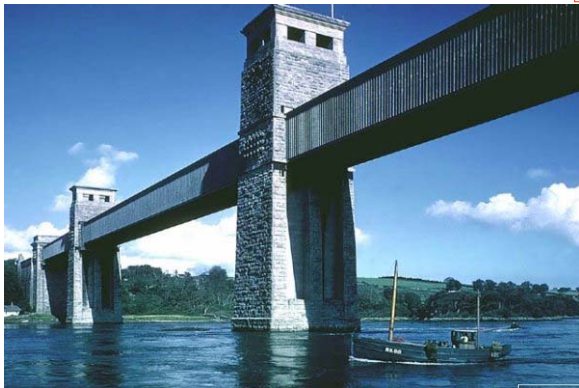
1850



Wrought Iron

The original box section Britannia Bridge, in a circa 1852 illustration

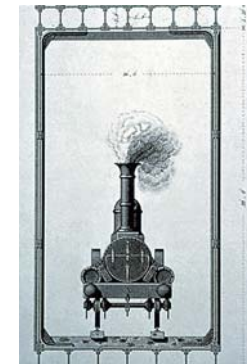
1850



Wrought Iron

長方形管形橋(b)
(1884年)英国

1850



[Britannia Bridge](#)

Wrought Iron

Postcard picture of the bridge from circa 1886

1850



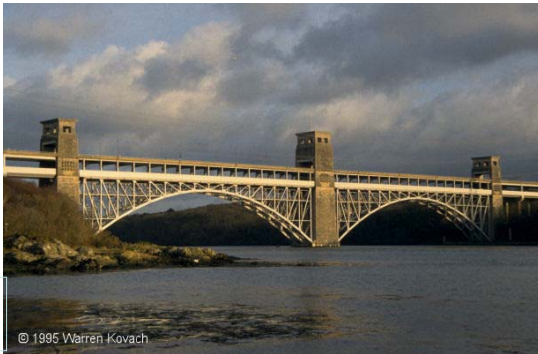
Wrought Iron

The post 1970 Britannia Bridge from the east along the [Menai Strait](#), retains Stephenson's original piers



Two-tier steel truss arch bridge

The post 1970 Britannia Bridge from the east along the [Menai Strait](#), retains Stephenson's original piers



Two-tier steel truss arch bridge

© 1995 Warren Kovach

The post 1970 Britannia Bridge from the east along the [Menai Strait](#), retains Stephenson's original piers



Two-tier steel truss arch bridge

The post 1970 Britannia Bridge from the east along the [Menai Strait](#), retains Stephenson's original piers

Two-tier steel truss arch bridge



クリフтон吊橋
(1864年)英国

1864



CLIFTON BRIDGE

1864



CLIFTON BRIDGE

1864



EIFFEL, ALEXANDRE GUSTAVE



1884

Wrought Iron

Garabit Bridge, Massif Central, France

EIFFEL, ALEXANDRE GUSTAVE



Plate for Ponte Maria Pia, Port, Lisbon, Portugal

EIFFEL, ALEXANDRE GUSTAVE



1877

Wrought Iron

Ponte Maria Pia, Port, Lisbon, Portugal

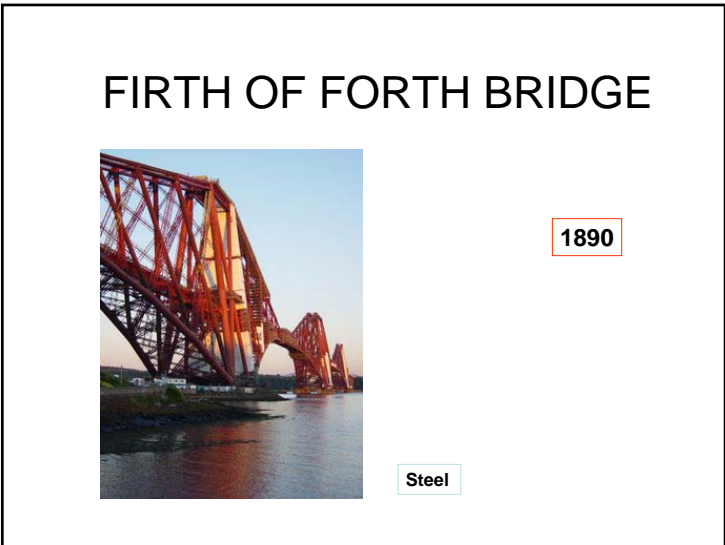
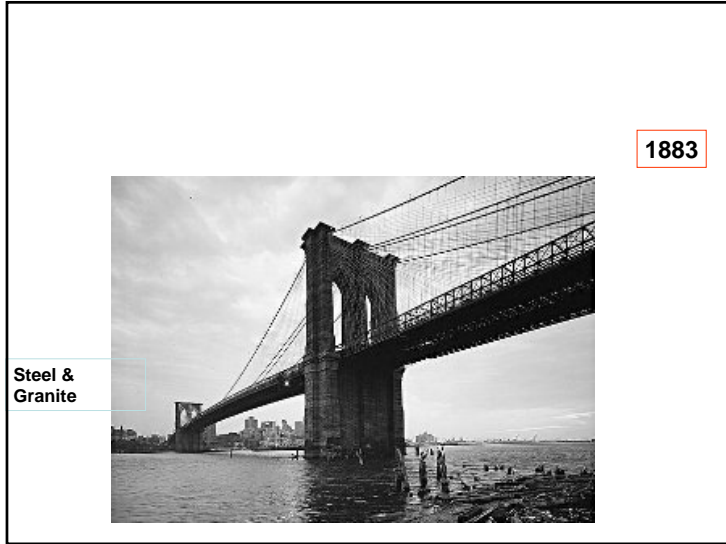
ROEBLING, JOHN AUGUSTUS



1883

Steel & Granite

Brooklyn Bridge, Manhattan and Brooklyn, New York, 1904 Picture Collection, The Branch Libraries, The New York Public Library



FIRTH OF FORTH



1890

Steel

FIRTH OF FORTH BRIDGE



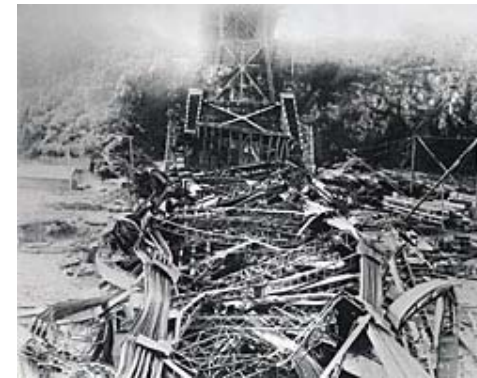
QUEBEC BRIDGE



1917

Steel &
Granite

QUEBEC BRIDGE On June 15, 1907



Quebec Bridge (1907, 1916)

- Location: St. Lawrence River
Cause of failure: **Design flaw**

Steel &
Granite

1917



1st Accident:
August 29, 1907

Quebec Bridge

BUCKLING

1st Accident:
August 29,
1907

2nd Accident:
September, 1916

IGNORANCE

ゴールデンゲート橋 (1937年)米国



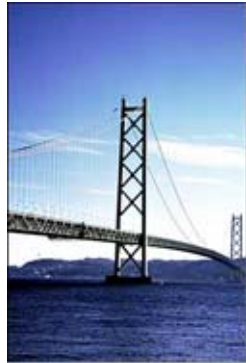
Steel &
Concrete

ベラザノ・ナローズ橋 (1964年)米国



AKASHI STRAIT BRIDGE

1998



Steel &
Concrete

AKASHI STRAIT BRIDGE

1998

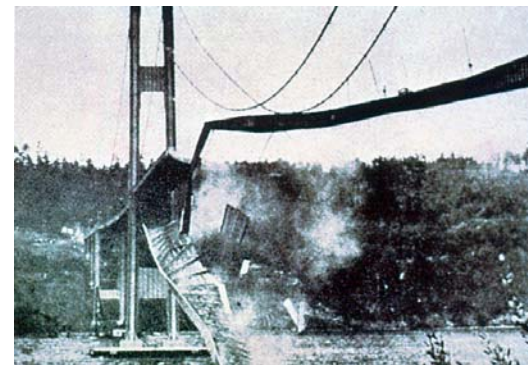


Steel &
Concrete

OLD TACOMA NARROWS BRIDGE

- The bridge earned the nickname “Galloping Gertie” for its unusual rolling, twisting behavior. Many drivers complained of seasickness.
- Thrill-seekers often crossed the Tacoma Narrows just to experience the bridge in unusual rolling and twisting behavior.
- In 1992, Gertie sunken remains were placed in the National Register of Historic Places to protect them from being stolen.

タコマ・ナローズ橋 (1940年)米国



YUMEMAI BRIDGE

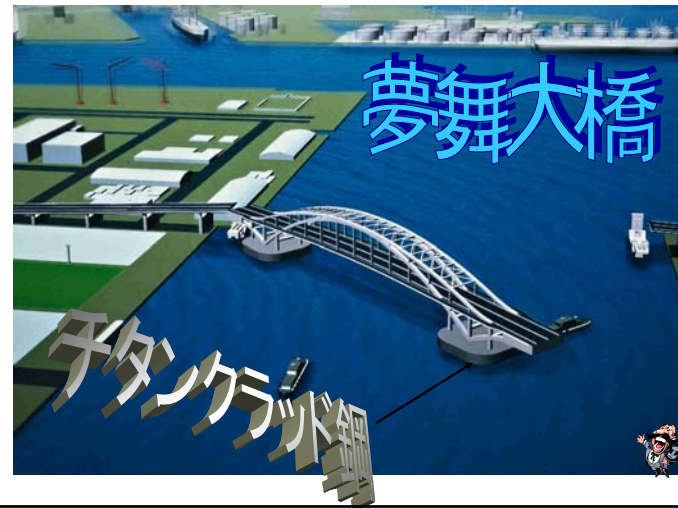


2000

Yumemai Floating Bridge after the on-site installation.
Courtesy of Osaka Construction Industry Times.



Yumemai Bridge, Osaka



PRESENT TECHNOLOGY AND FUTURE PROSPECT

- Various kinds of structural steels are utilized at the present time in the fields of bridges and buildings.
- For example, atmospheric corrosion resistant steel or weathering steel and fire resistant steel with water entrapped inside the tubular cross-section were developed in 1960's;
- Although the cost of stainless steel is more expensive than ordinary carbon steel, the life cycle cost may be considered to be reasonably low and thus competitive.

PRESENT TECHNOLOGY AND FUTURE PROSPECT

- In the future, the cycle maintenance of existing structures is surely one of the main themes for the structural engineering.
- The logistics such as the asset management system is becoming more and more important with the life cost, LCC, kept minimum under the philosophy of the preventive maintenance and under the condition of sustainable development of the earth.

ありがとうございました