

第95回原子力安全問題ゼミ「原発震災」
京都大学原子炉実験所 / 03年12月12日

地震学からみた 日本の原子力発電所の 耐震安全性

石橋 克彦

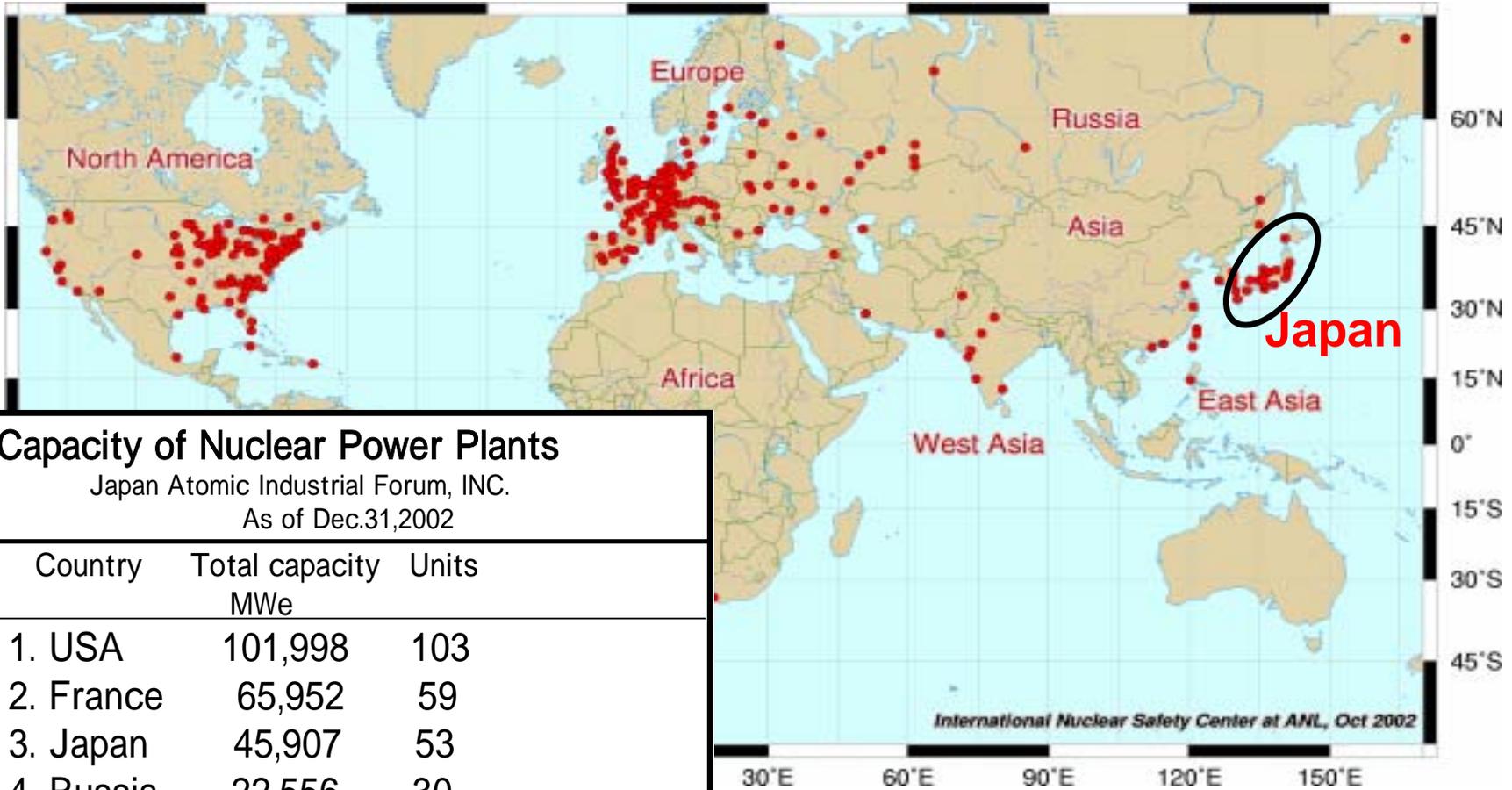
神戸大学・都市安全研究センター

樋口健二写真集『原発』より / 美浜原発

World Map of Nuclear Power Reactors

International Nuclear Safety Center at Argonne National Laboratory, U.S. Department of Energy

http://www.insc.anl.gov/pwrmaps/map/world_map.php



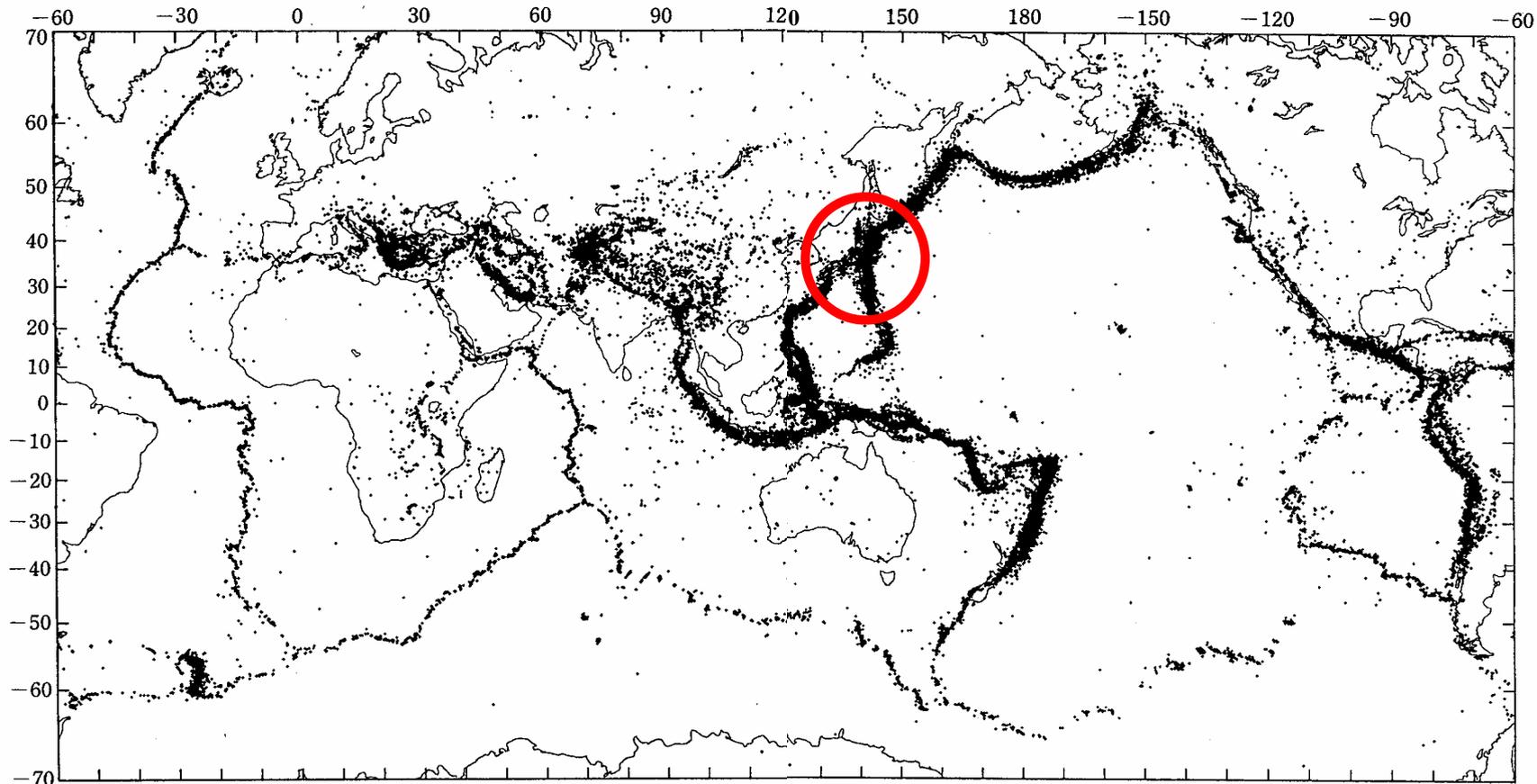
Capacity of Nuclear Power Plants

Japan Atomic Industrial Forum, INC.
As of Dec.31,2002

Country	Total capacity MWe	Units
1. USA	101,998	103
2. France	65,952	59
3. Japan	45,907	53
4. Russia	22,556	30
5. Germany	22,365	19

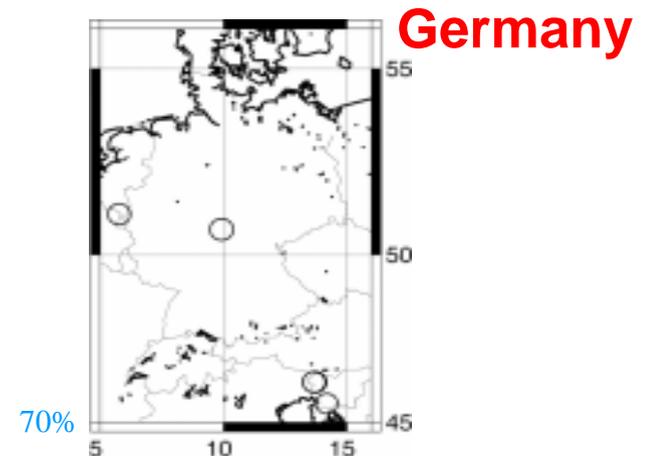
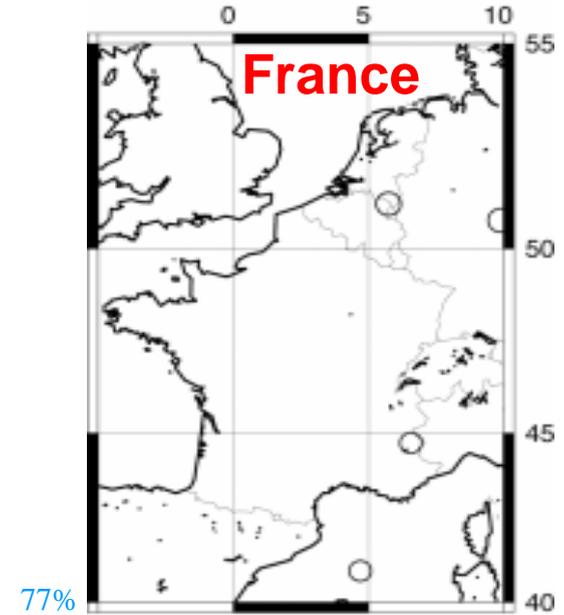
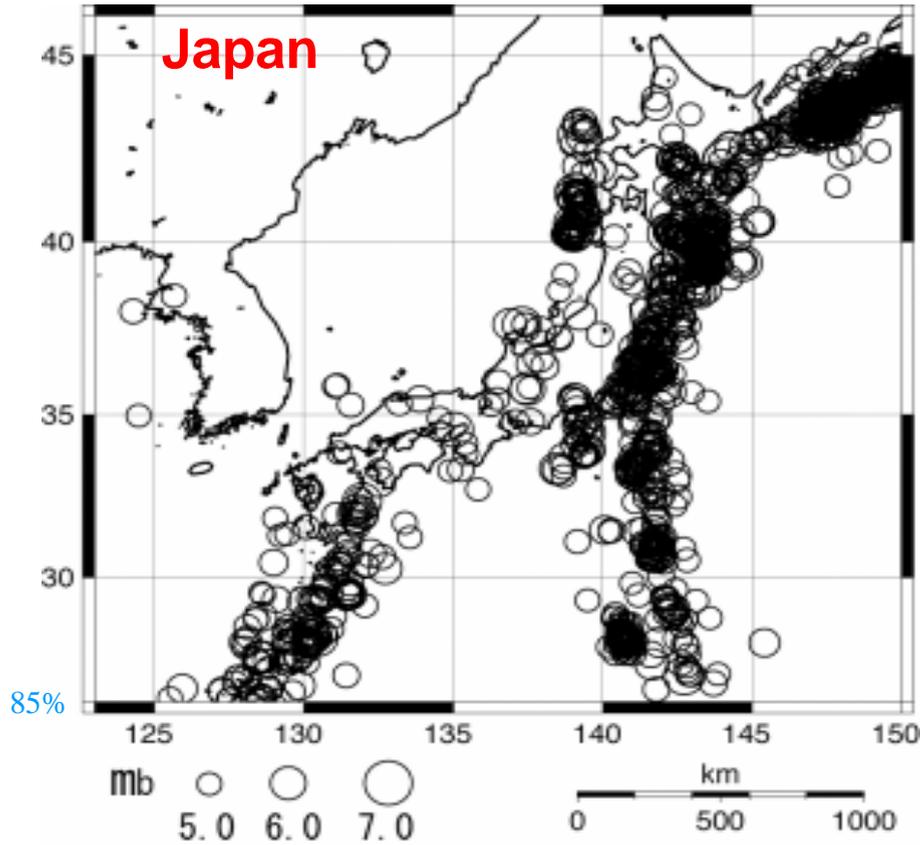
World Seismicity: 1975 ~ 1994 , M 4.0 , depth 100km

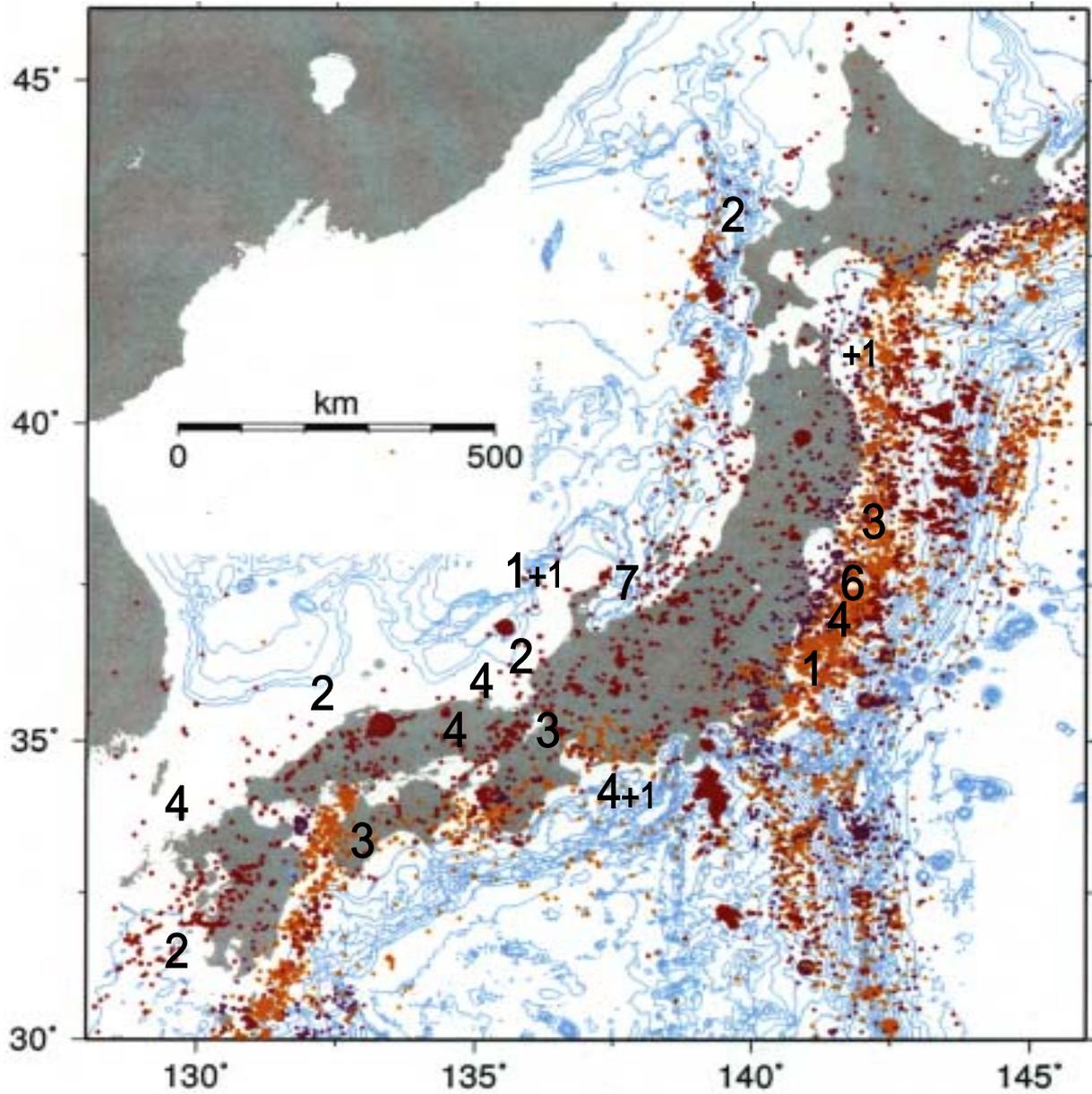
Data from International Seismological Center



Earthquakes: m_b 5.0, h 60km 1981 Aug.1 ~ 2001 Jul.31

Data from International Seismological Center

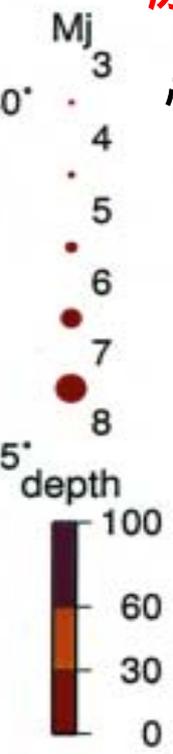




気象庁一元化
データによる
震央分布
(97.10.1-01.9.30)

原子力発電所
16+1
ふげん, もんじゅ
を除く

原子炉
52+3



核燃料施設
六ヶ所, 東海

1. 現行の原子力発電所の耐震設計の概略

考えられる最大の地震動でも「止める・冷やす・閉じ込める」機能を確保

耐震重要度分類 (A_s , A, B, C)

< システム全体の耐震性は低いのではないか? >

地震の想定 : 設計用最大地震 / 設計用限界地震

将来起こりうる最強の地震 / およそ現実的ではないと考えられる限界的な地震

地震動の策定 : 基準地震動 S_1 , S_2 (解放基盤表面で)

M, 最大速度振幅, 周波数特性(応答スペクトル) など 模擬地震波を作成

地震動には様々な周期の波が含まれている。ある地震動について、各周期で、その固有周期の構造物がどれほど揺れやすいかを示したものが応答スペクトル

動的応答解析

(モデル化した建物・機器を計算機上で揺すり, 変形・応力をみる)

『発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針』

1978年策定, 1981年一部見直し

建物・構築物は原則として剛構造にする

重要な建物・構築物は岩盤に支持させなければならない

2. 原子力発電所の耐震設計の問題点 (地震と地震動) 原発専門家は、切れば血が滴るような生きた地震を知らない

想定地震 (設計用最強 / 限界地震) の致命的誤り

- ・プレート間と活断層の2種類しか考えていなかった
- ・スラブ内大地震を夢想だにしてこなかった
- ・活断層がなくても大地震が起こることを考慮していない
直下地震はM6.5しか考慮しない
- ・活断層がある場合も取り扱いが極めて不適切
地震規模, 活動時期, 一連の活断層を活断層帯・起震断層と見ない
- ・「大地震空白域」こそ要注意であることを考えていない
歴史地震と活断層偏重 地震テクトニクス / 地震地体構造の意味

基準地震動の策定手法が古めかしく, 過小評価傾向が強い

- ・「松田式 + 金井式 + 大崎の方法」: 地震の本質が不明な時代の
虚構的・便宜的方法で, いまや全く時代遅れ
- ・政府が使っている現在の標準的な強震動予測手法からみて非常に古い
- ・上下動を軽視しすぎではないか
- ・多重震源 / アスペリティや枝分かれ断層の活動を考えていない

平均像主義の問題点

大余震の影響 (連続パンチ) を考慮していない

要するに，活断層の長さに対して単純に松田式を当てはめて地震のマグニチュードを算定してはいけない

総合的な考察によって地下の震源断層面を想定することが本質的

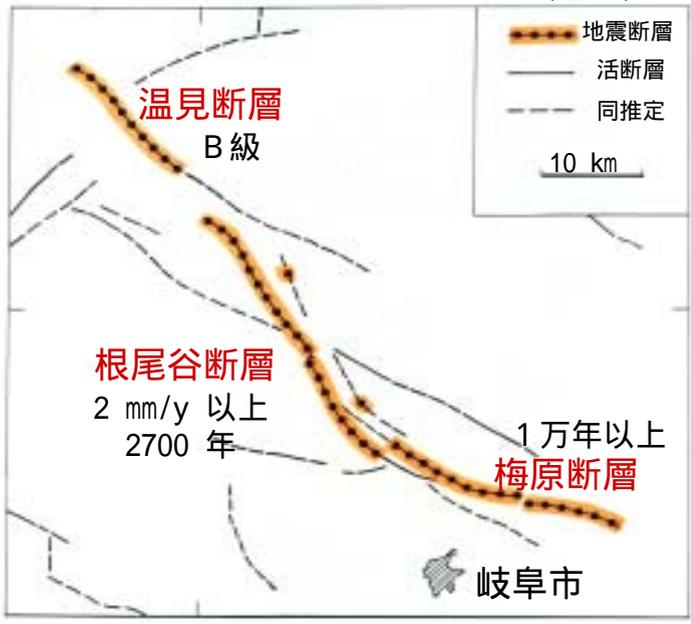
短くても活断層があれば M7 級大地震が起こりうる；1927年の例

隣接する活断層が連動することも多い

活断層帯

起震断層

1891年濃尾地震 栗田泰夫・他 (1999)



1995年兵庫県南部地震



地震調査研究推進本部地震調査委員会 (1999)

活断層 甲 5 km



活断層 乙 20 km



アスペリティ

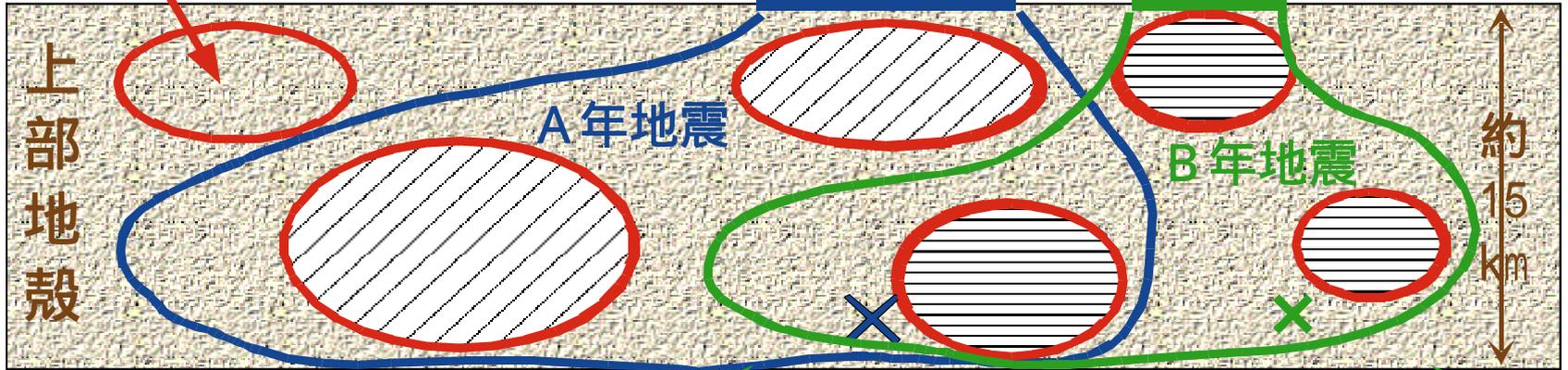
地表

A年地表地震断層

Ls(A) ~ 10 km

B年地表地震断層

Ls(B) ~ 6 km



B年地震の震源断層面

A年地震の震源断層面

L0(A) ~ 40 km

M 7.3

L0(B) ~ 30 km

M 7.0

起こりうる地震の震源断層面

L0(X) ~ 53 km

M 7.6

4. 「松田式 + 金井式 + 大崎の方法」の古さ

—政府による最新の地震動予測手法との比較—

活断層に関する地震による地震動の計算法

隣接する活断層も別個に扱う 複数の活断層が連動すると考える (活断層帯)

松田式 を適用 (活断層の長さからMを計算)

活断層の中央を震央として、その1点で地震が起こるとする

震源の特性化 { 想定地震の震源断層面の位置・形状・規模を評価
震源断層面のアスペリティ・破壊過程を評価

金井式 の適用 (Mと震央距離 から最大速度振幅 V_{max} を求める)

大崎スペクトル の適用 (Mと V_{max} から応答スペクトルを作る)

Mから振動継続時間 t_d と振幅包絡線の経時的変化を求める

以上の特性に適合するように模擬地震動を人工的に合成

最新的手法は、今般の想定東海
地震の見直しに実際使われた
(活断層ではないが)

地下構造モデルを詳細に設定

地震動の波形を計算

応答スペクトル・最大速度振幅がわかる

「もんじゅ」の例

考慮すべき地震と、それによる地震動の最大速度震幅 (kine)
設計用限界地震と S₂ の場合

1. 活断層を選定し長さを設定

Ex. 甲楽城断層, 20 km

2. 松田式で M を想定

Ex. 甲楽城断層地震, M 7.0

3. 断層の中央を震央として震央距離を計算

Ex. 甲楽城断層地震, 11.5km

4. 金井式で S₂ の最大速度振幅を計算 (M, V_{max})

Ex. 甲楽城断層地震, 18.2 kine

第 5.5 - 1 表 考慮すべき地震とそれによる地震動の最大速度振幅

	項目	規模 M	震央距離 △ (km)	最大速度 振 幅 V _{max} (Kine)	遠 離 近 離 の 別	備 考 (番号は文献 5 の地震番号)
考慮すべき 最強地震	歴史地震	8.0	5 7.2	1 3.8	遠	3 0 0 濃尾地震
		7.9	5 7.2	1 2.2	遠	3 0 0 濃尾地震
		7.8	5 4.1	1 1.5	遠	1 1 5 寛文近江の地震
		7.9	6 1.1	1 1.2	遠	8 天平美濃の地震
		6.9	2 1.0	1 0.5	近	5 5 6 越前岬沖地震
		8.1	7 8.8	1 0.4	遠	7 8 天正畿内の地震
		6.7	1 8.2	9.3	近	5 1 正中近江の地震
		7.3	4 4.6	7.6	遠	5 1 5 福井地震
		7.4	4 9.7	7.6	遠	4 2 元暦近江の地震
		7.4	6 6.0	5.2	遠	2 2 9 文政近江の地震
	7.5	8 2.1	4.4	遠	4 4 5 北丹後地震	
	活断層	7.0	2 7.3	9.1	近	柳ヶ瀬断層(南)
	統計的 期待値	—	—	1 1.5	—	3 0 0 年期待値
		—	—	9.0	—	2 0 0 年期待値
考慮すべき 限界地震	活断層	<u>7.0</u>	<u>1 1.5</u>	<u>1 8.2</u>	近	<u>甲楽城断層</u>
		7.2	1 6.5	1 8.0	近	木ノ芽峠断層
		6.9	1 2.1	1 5.9	近	S-2 1~S-2 7 断層
		7.2	2 1.0	1 4.9	近	柳ヶ瀬断層
		7.0	2 0.2	1 2.2	近	S-1~S-6 断層
		6.9	2 4.0	9.2	近	三方断層
		6.3	1 4.0	7.0	近	野坂断層
	地震地体 構 造	7.8	6 0.0	1 0.1	遠	
直下地震	6.5	—	1 3.4	近		

『高速増殖炉もんじゅ発電所・原子炉設置許可申請書 / 添付書類六』(動燃事業団, 1980) より

活断層研究会
(1991)

20 km

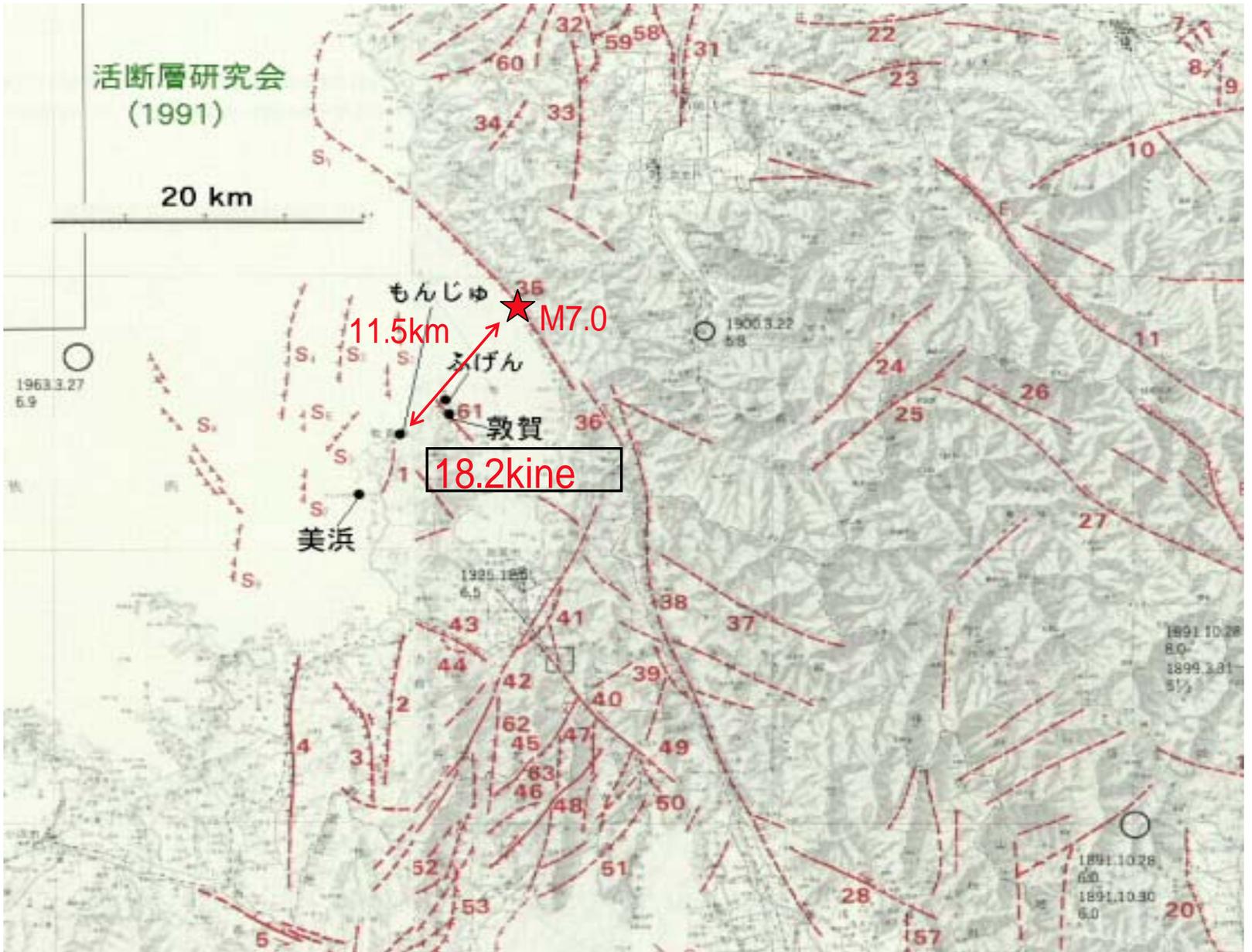
1963.3.27
5.9

もんじゅ **★ M7.0**
ふげん

18.2km

敦賀

美浜



5 . 日本列島の地震情勢

(スラブ内大地震は、いつ・どこで起こるか分からない)

長期的には、ほぼ日本列島全体が大地震活動期に入るだろう

特に首都圏と「アムールプレート東縁変動帯」

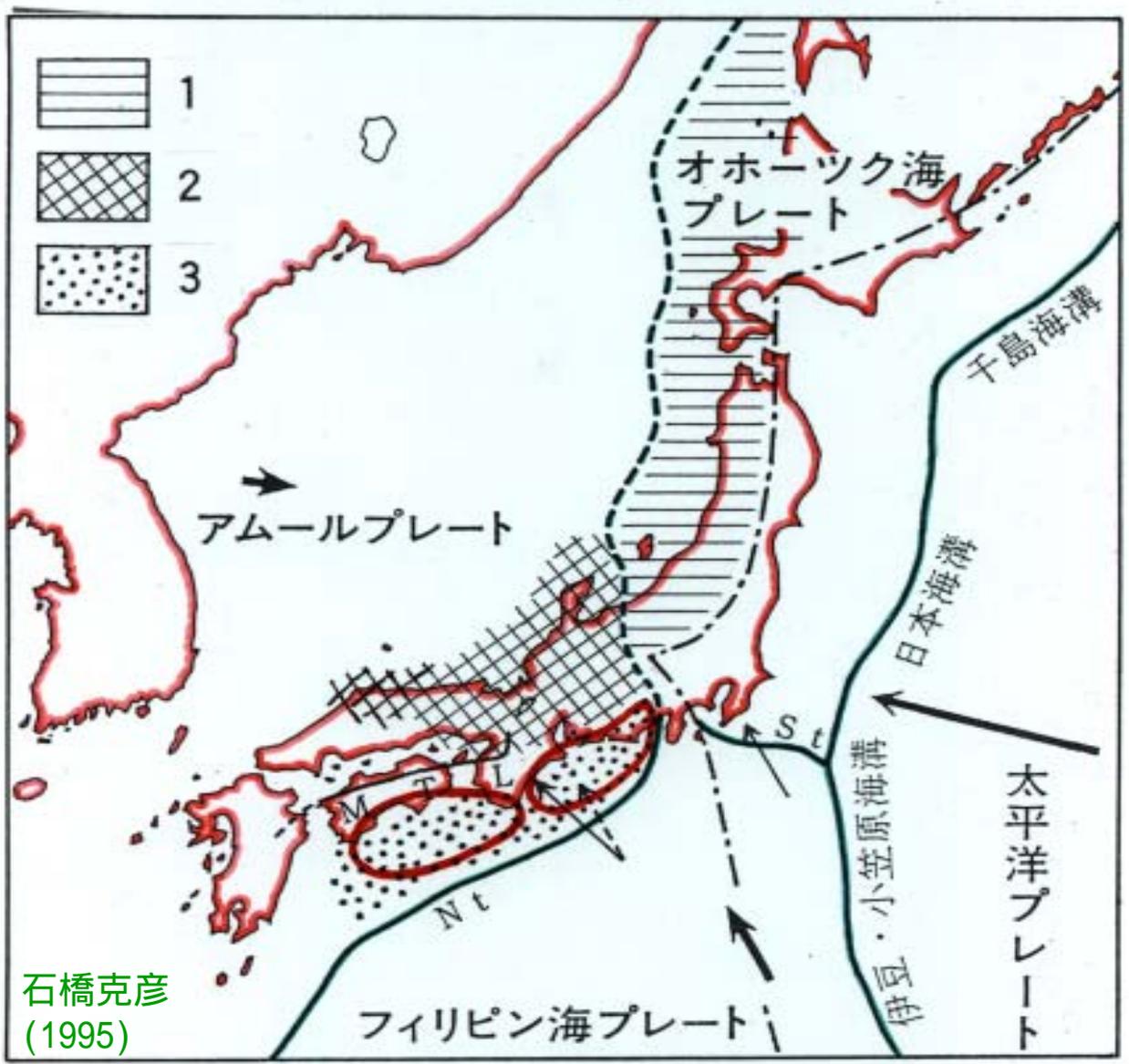
アムールプレート東縁変動帯

(サハリン～日本海東縁～中部・近畿衝突帯～駿河・南海トラフ)

- ・ 93年北海道南西沖(M7.8) 95年兵庫県南部(M7.3) 以後の活動
- ・ 1854年, 1944・46年の東海・南海巨大地震の前数十年間; 大地震続発
- ・ 今後数十年以内に次の東海・南海巨大地震が発生することはほぼ確実
- ・ 日本海東縁(海陸, 脊梁まで)～信越～北陸～中部・西南日本～中央構造線
～九州で大地震が起こりやすくなるだろう (どこで/いつ, は別問題)

東海・南海巨大地震につながる (今世紀半ばまで)

アムールプレート東縁変動帯
(作業仮説)



石橋克彦
(1995)

No.	年月日	場所	M (マグニチュード)
1	1791. 7. 23	松本付近	約 6.3/4
2	1792. 6. 13	積丹岬沖	約 7.1
3	1793. 2. 8	西津軽	6.9~7.1
4	1799. 6. 29	金沢付近	6.6~7.0
5	1802. 12. 9	佐渡	6.5~7.0
6	1804. 7. 10	象潟地震	7.0±0.1
7	1810. 9. 25	男鹿半島	6.5±1/4
8	1819. 8. 2	近江	7 1/4 ± 1/4
9	1828. 12. 18	三条付近	6.9
10	1830. 8. 19	京都付近	6.5±0.2
11	1833. 12. 7	庄内沖	7 1/2 ± 1/4
12	1847. 5. 8	善光寺地震	7.4
13	1847. 5. 13	頸城地方	6 1/2 ± 1/4
14	1853. 1. 26	信濃北部	6.5±1/4
15	1854. 7. 9	伊賀上野	7 1/4 ± 1/4

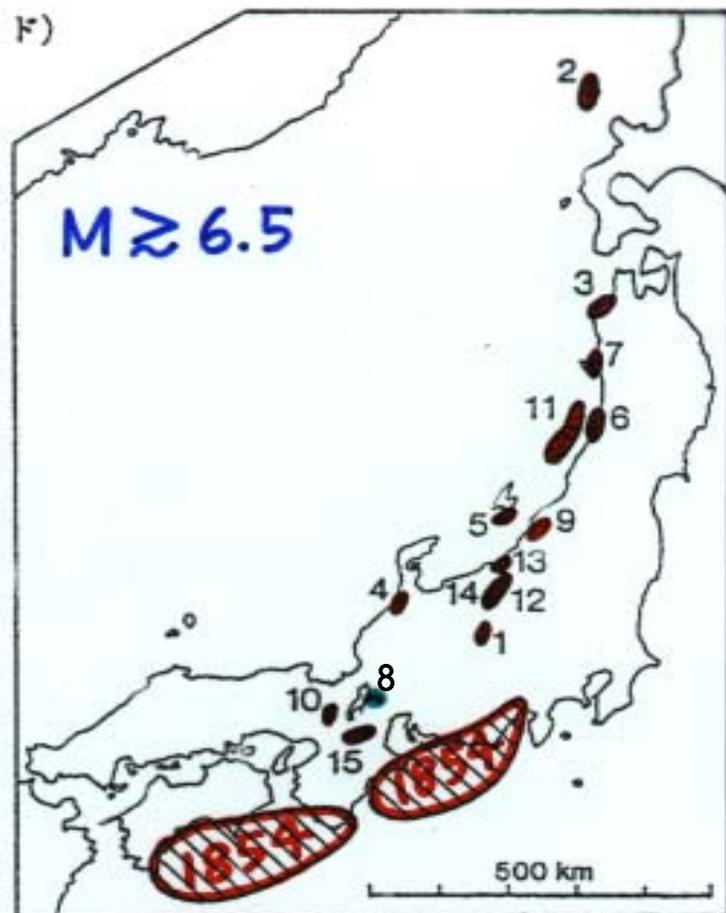
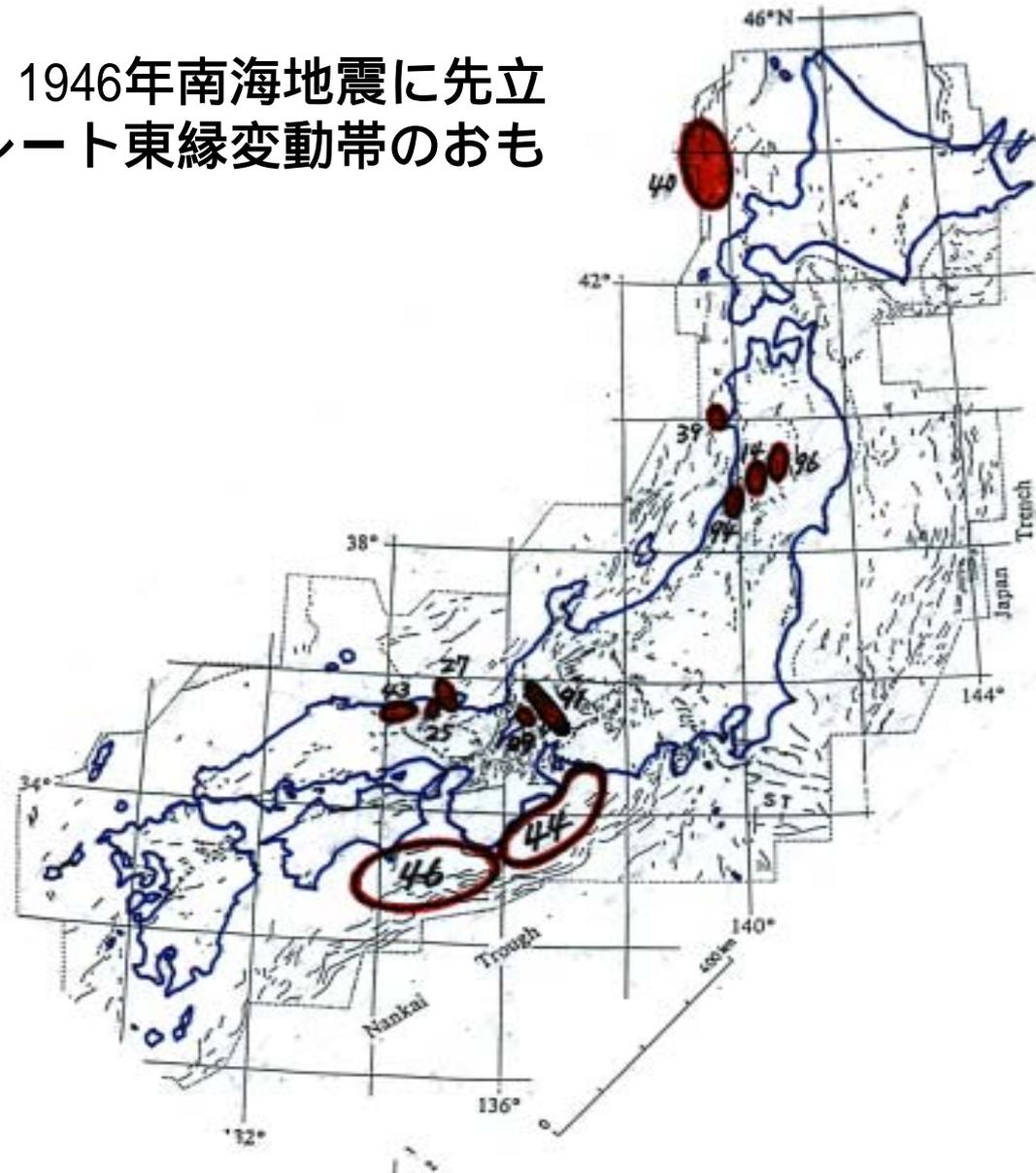
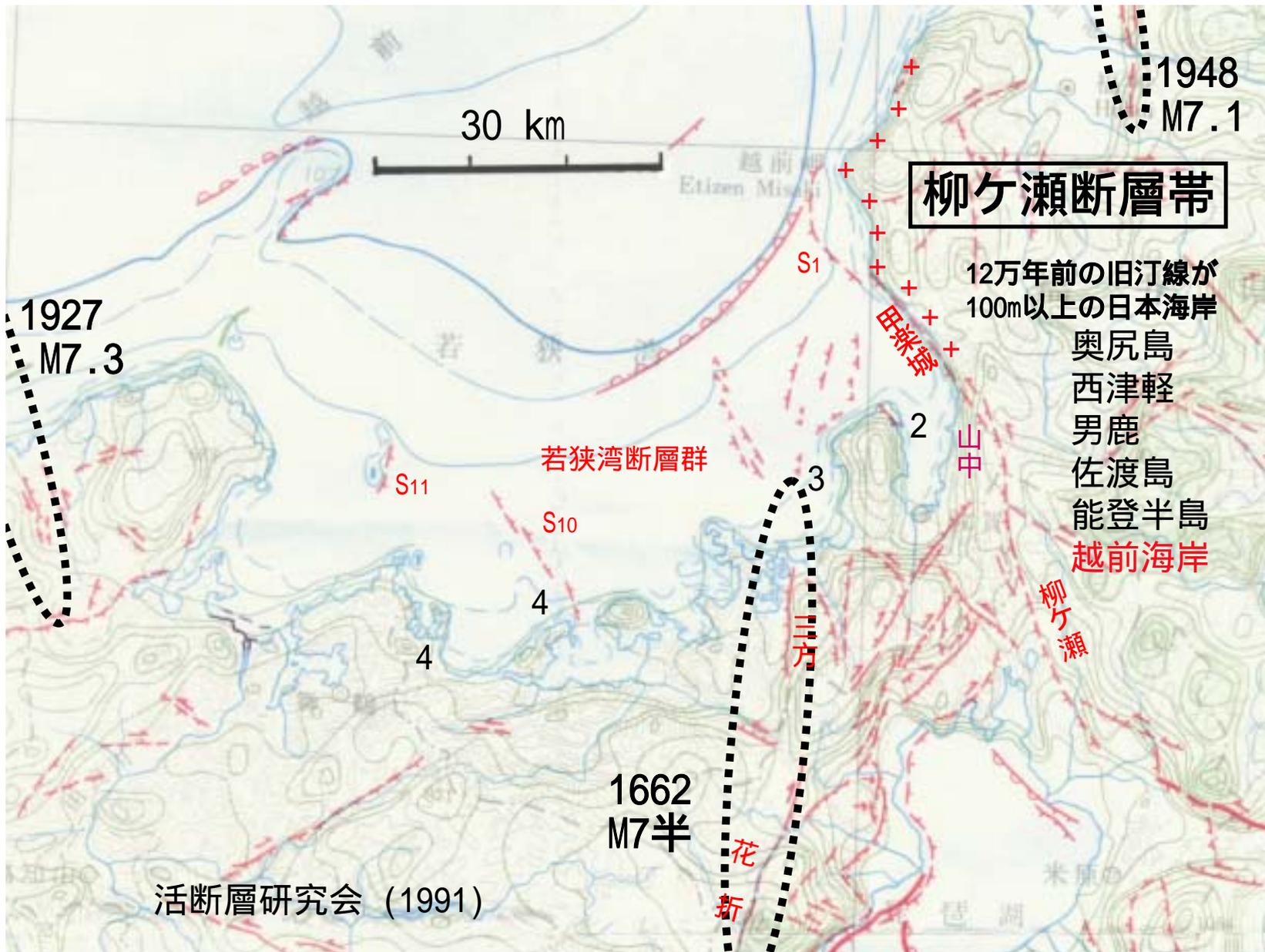


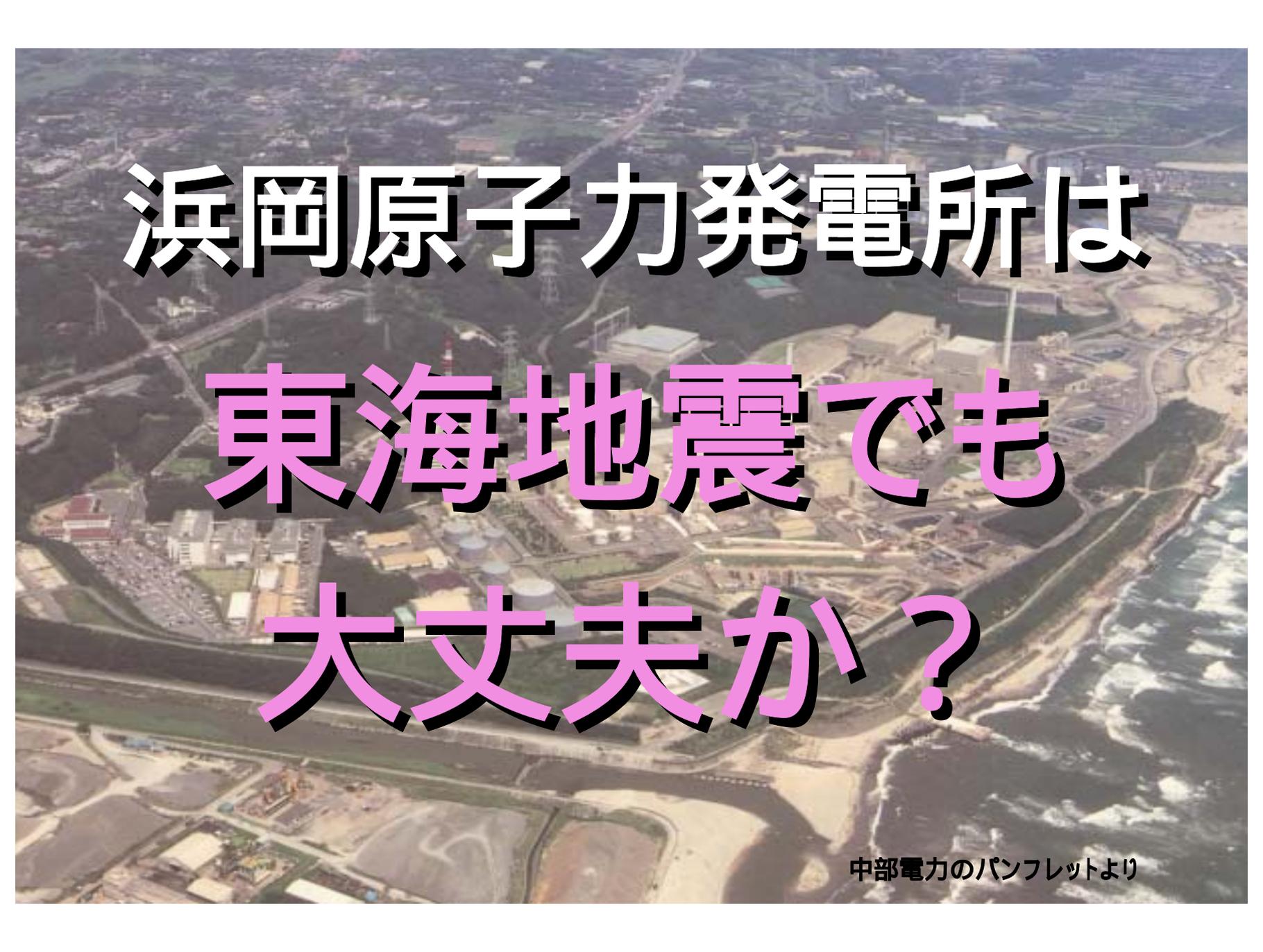
図3 1854年安政東海・南海地震(ハッチ)に先立つ数十年間に、アムールプレート東縁変動帯で発生した大地震(M6.5以上). 地図の数字は、左表の地震No. Mは、No.4は寒川(1992), それ以外は宇佐美(1987)による.

石橋(1995)

1944年東南海・1946年南海地震に先立つアムールプレート東縁変動帯のおもな大地震







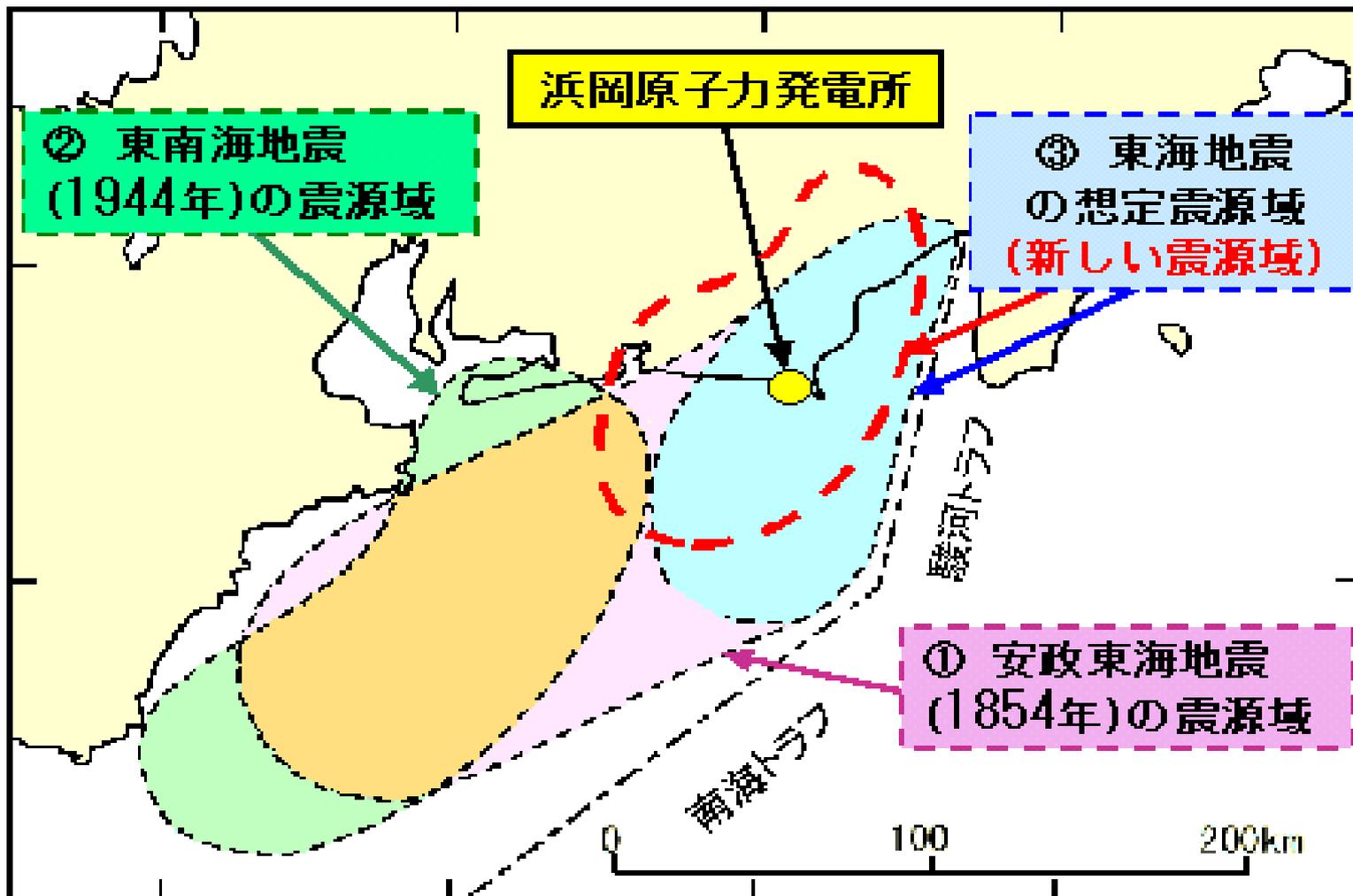
浜岡原子力発電所は

東海地震でも

大丈夫か？

中部電力のパンフレットより

浜岡原子力発電所 (B W R 4 基 , 362 万 k W)



東海地震とは何か

20xx年東海地震

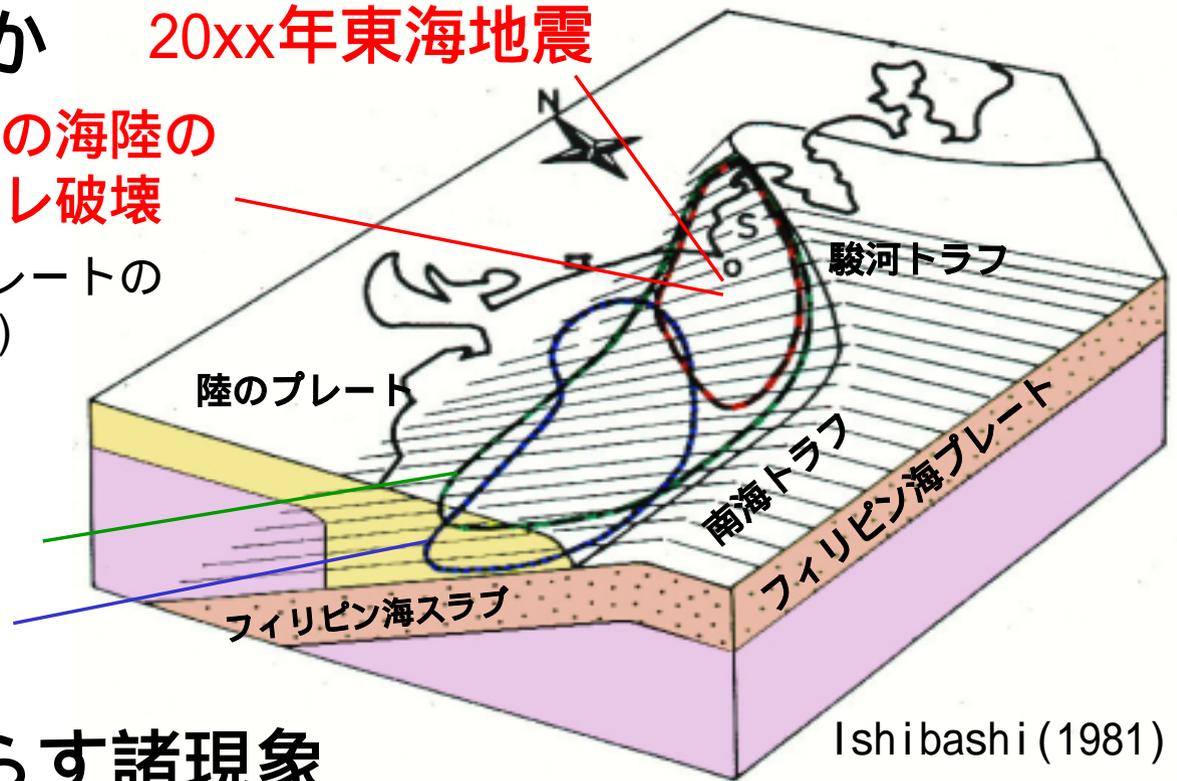
駿河湾～遠州灘地域の海陸の
地下の巨大な岩石ズレ破壊

原因はフィリピン海プレートの
沈み込み (年間約 3 cm)

陸のプレートの東進も
重要？

1854年安政東海地震

1944年東南海地震

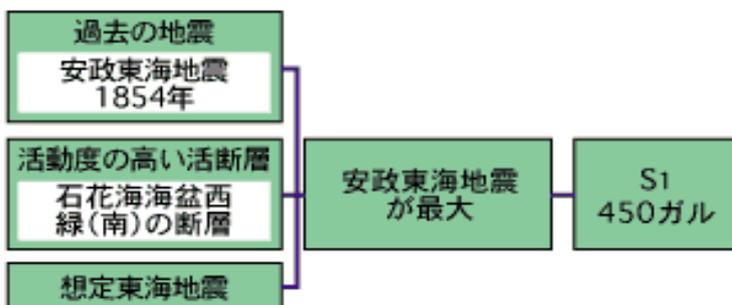


東海地震がもたらす諸現象

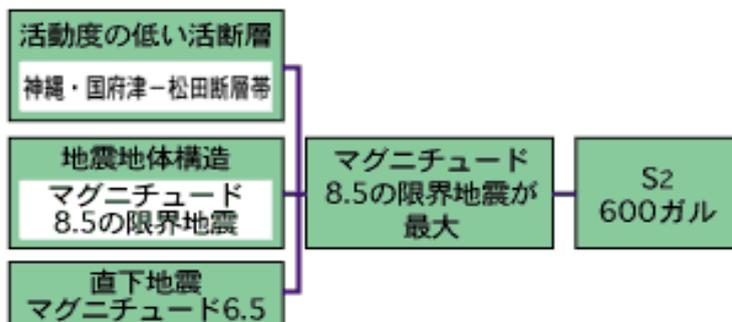
- ・ 地表の大きなズレ(破断) = 地表地震断層：例えば富士川断層帯
- ・ 揺れ(地震動)：近地の激烈な揺れ / 広範囲の大揺れ
- ・ 地盤の隆起沈降 / 水平移動 = 地殻変動：海底地殻変動 大津波
- ・ 無数の余震：M 7 級大余震や誘発地震も

浜岡原子力発電所の基準地震動 S_1 と S_2

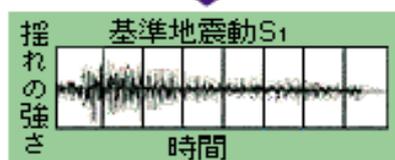
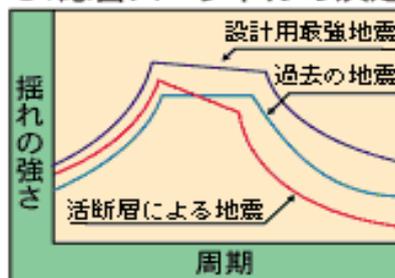
将来起こりうる最強の地震による地震動として、過去の地震および過去1万年の間に活動した活断層による地震を対象に、それぞれ揺れの周期および強さを評価し、これら全てを上回るような地震動を設定します。これを設計用最強地震による基準地震動 S_1 といいます。



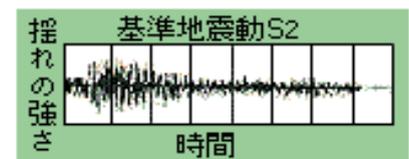
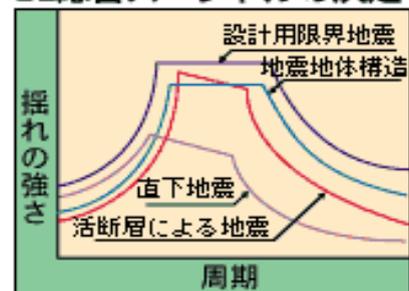
およそ現実的ではないと考えられる限界的な地震による地震動として、過去5万年の間に活動した活断層による最大の想定地震、地震地体構造から考えられる最大の地震、さらには直下地震を対象にそれぞれ揺れの周期および強さを評価し、これら全てを上回るような地震動を設定します。これを設計用限界地震による基準地震動 S_2 といいます。



S_1 応答スペクトルの決定

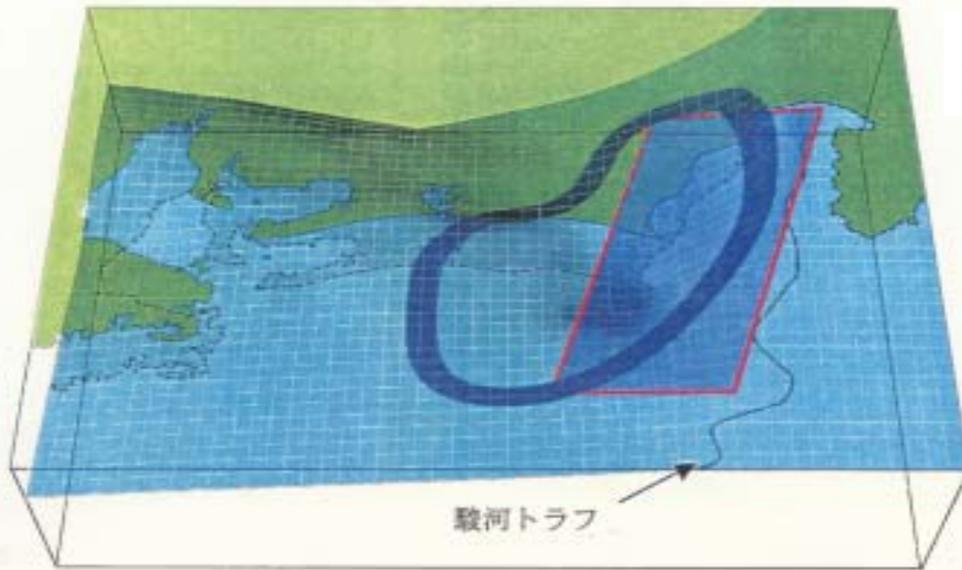


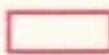
S_2 応答スペクトルの決定



想定震源域

強震動予測のための
アスペリティの分布と
破壊開始点のモデル

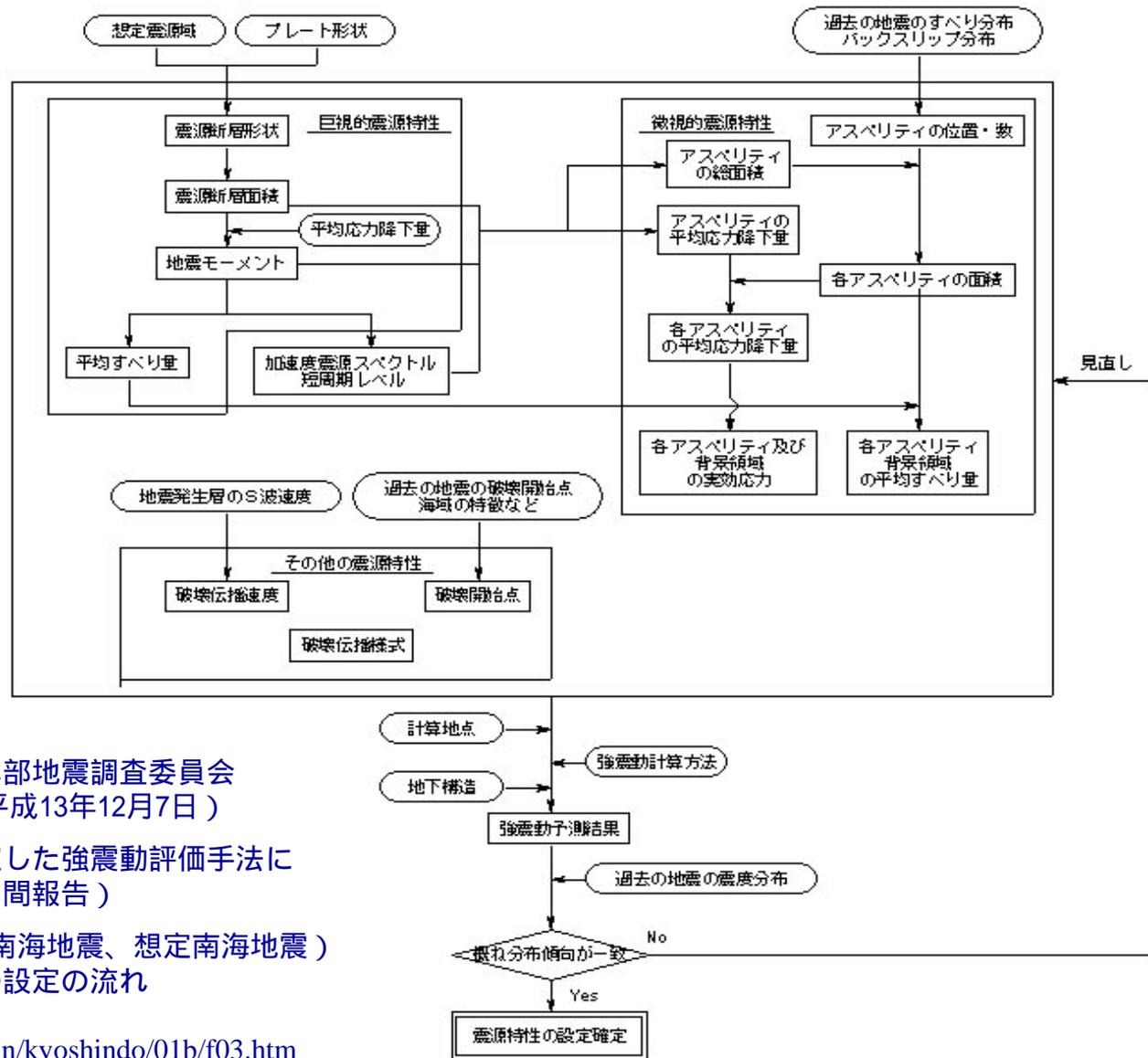


 : 新たな想定震源域  : 中央防災会議(1979)による想定震源域



揺れ(地震動)の予測

中央防災会議「東海地震に関する
専門調査会」による見直し
(2001年12月11日報告)



地震調査研究推進本部地震調査委員会
強震動評価部会（平成13年12月7日）

南海トラフの地震を想定した強震動評価手法に
ついて（中間報告）

図3 海溝型地震（想定東南海地震、想定南海地震）
の震源特性の設定の流れ

中央防災会議「東海地震に関する専門調査会」による 想定東海地震の新しい震源断層モデルの意義と注意点

震源域と断層モデルの見直しの主目的は 地震防災対策強化地域の見直し

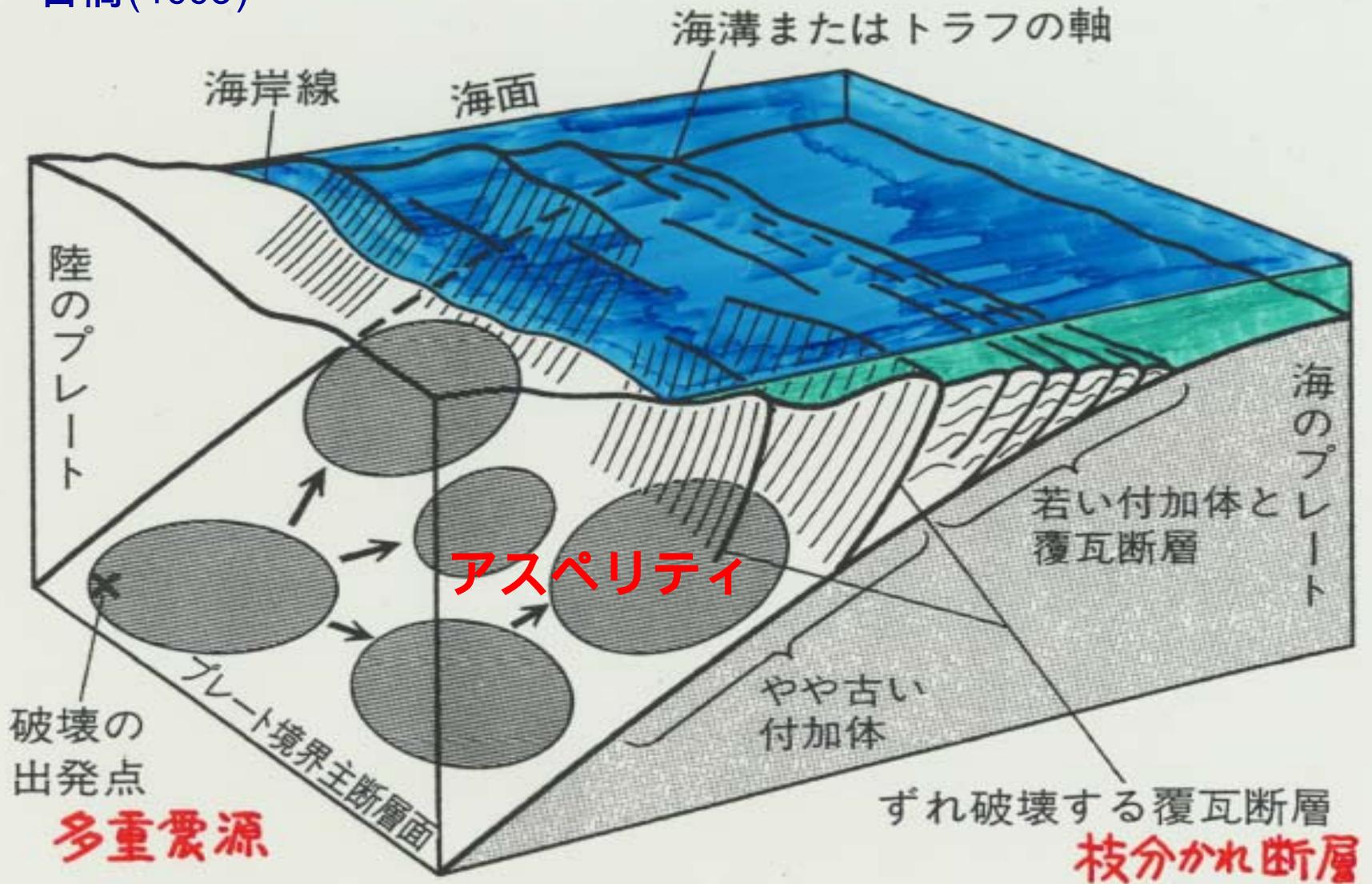
震源断層面(プレート境界面)の形状，セグメント分け，
アスペリティの数・面積・位置，破壊の出発点，枝分かれ断層
などは，不確定性や未知の要素を含んでいる．

これらの不確定さは，遠方(強化地域の外縁)を
検討するには，それほど深刻ではない．

しかし，震源域付近(震度6～7が想定される地域)の個々の
地点の地震動を問題にするときには，大きく影響する．

近場の強震動を問題にするときには，東海地震が今回の
モデルのとおりが発生すると考えてはいけない．

石橋(1998)

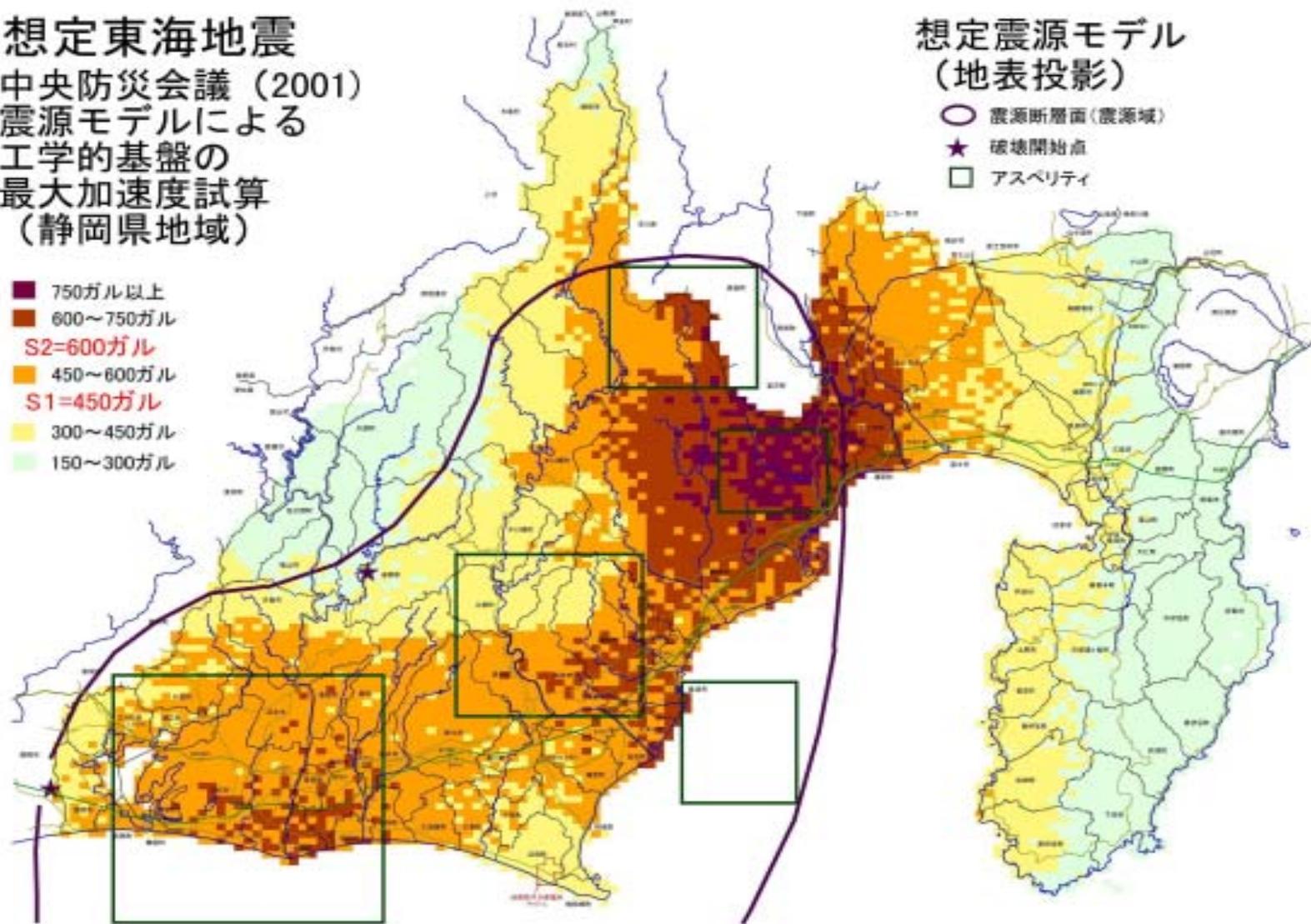


想定東海地震 中央防災会議（2001） 震源モデルによる 工学的基盤の 最大加速度試算 （静岡県地域）

- 750ガル以上
- 600～750ガル
S2=600ガル
- 450～600ガル
S1=450ガル
- 300～450ガル
- 150～300ガル

想定震源モデル （地表投影）

- 震源断層面（震源域）
- ★ 破壊開始点
- アスベリティ

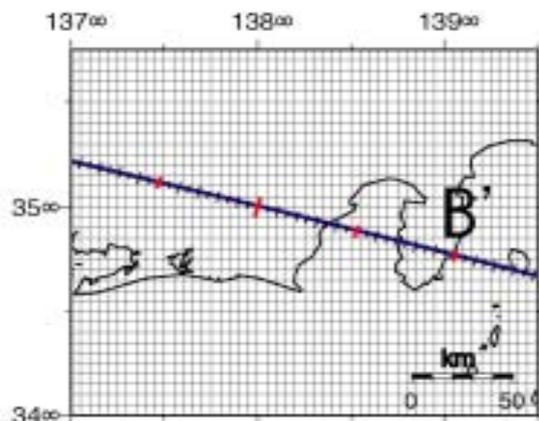


河本和朗氏提供

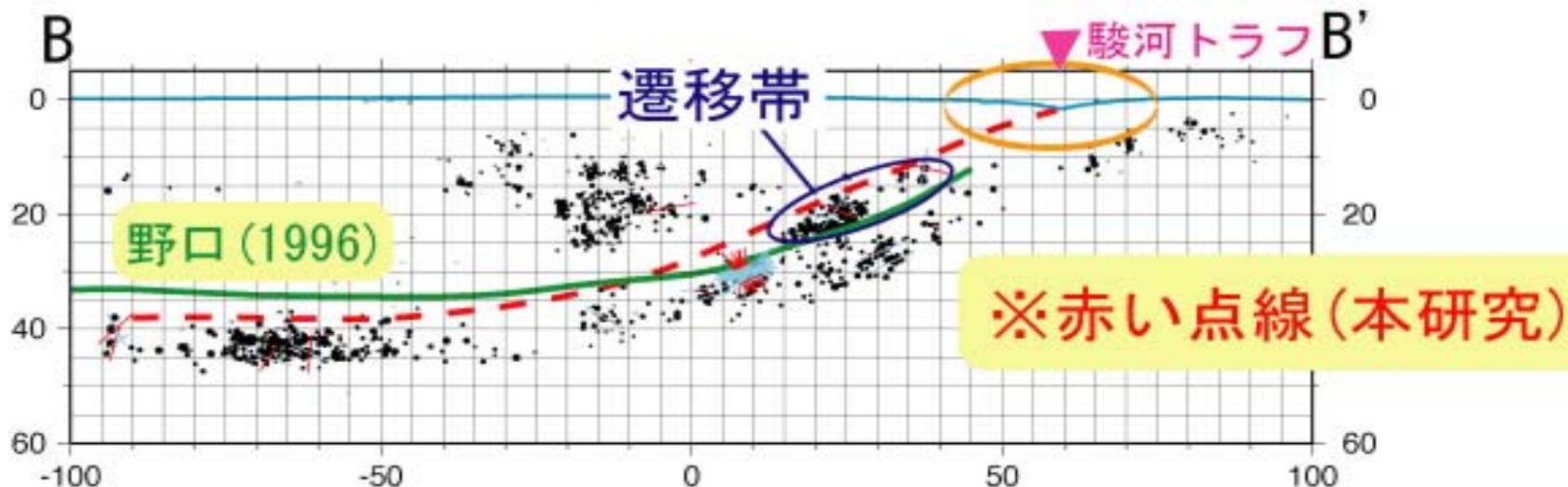
スラブ上面の推定方法

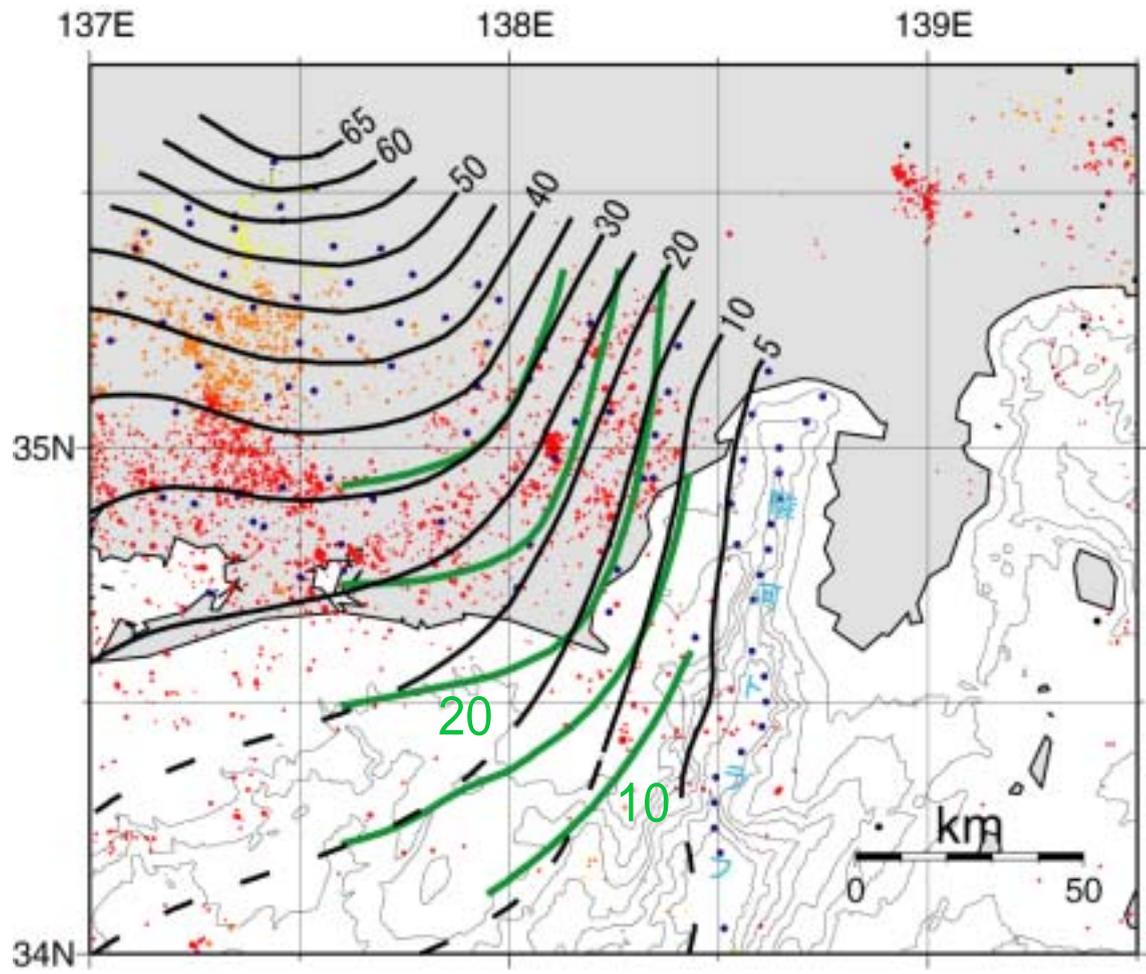
石橋克彦・浅海善成・三好崇之(2003)

▽断面の位置



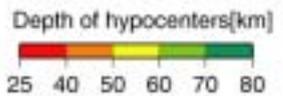
- 震源・発震機構解データ
1997年10月～2002年10月
気象庁一元化震源データ
- 海底地形
日本海洋データセンター500m
メッシュ水深データ





— 推定したスラブの上面
 (5km~65km、5km間隔)

— 東海地震の想定震源域(中央防災会議, 2001)
 (10km~30km、5km間隔)



石橋克彦・浅海善成・三好崇之(2003)

東海地震で浜岡原発はどうなるか？

S2を超える想定外の地震動に襲われる

- 外部電源喪失，全機でスクラム / 主蒸気隔離弁閉 / ECCS作動
- ・多くの機器・配管類の同時損傷（共通要因故障）
- ・多重の安全装置の全面ダウン
- ・短周期で損傷して固有周期が延び，引き続く長周期で大破損
制御棒，非常用発電機，バッテリーが無事に働くか？
- ・東海地方の停電は長時間続く

施工不良
老朽化！

本震で損傷した各部を，大余震の強震動が襲う

- ・激震動と余震が運転員に与える身体的・精神的影響
制御棒挿入不能，核暴走，電源喪失，
配管破断 冷却剤喪失，ECCS不作動，炉心溶融，
水蒸気爆発，水素爆発？，核爆発？
膨大な量の炉内放射性物質の外界への放出
気象条件に応じて「死の灰」が広範囲に降り注ぐ

全ては地震の起こり方と運 / 起こってみなければ分からない