

令和元年5月29日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04084

研究課題名(和文) 無電極スラスタ内のガス・プラズマ相互作用に伴う運動量輸送と制御

研究課題名(英文) Transport and control of plasma momentum associated with a plasma-gas interaction in a plasma thruster

研究代表者

高橋 和貴 (TAKAHASHI, Kazunori)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80451491

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、無電極スラスタ内のガス・プラズマ相互作用が運動量輸送・損失・推力発生に対して重要な効果を有しており、それらの理解と制御法を開拓することで、高密度プラズマ流発生と推進機高性能化が可能であることを明らかにした。その結果、磁気ノズルの発散から伸長を引き起こすプラズマ状態変化、磁気ノズル中を断熱膨張する電子の観測など、種々の興味深い現象も観測され、今後の学術研究の拡がりや推進機開発に寄与する成果が得られたといえる。また、高周波システムなどの周辺機器を含めた開発にも着手し、工学研究としての展開も可能な状態となった。

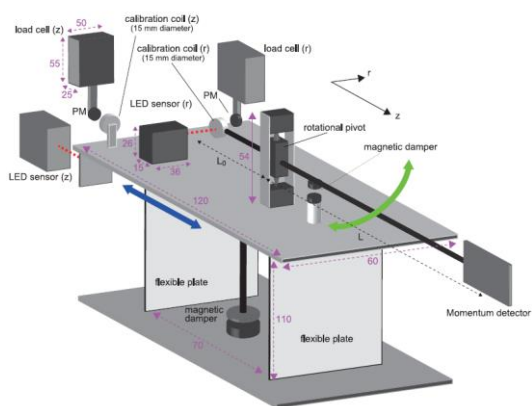
研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、無電極スラスタ内部の中性粒子-プラズマ相互作用を主軸として研究を行い、その体系的な理解と推進機およびプラズマ源の高性能化を実現した。その結果高密度プラズマ流の生成・制御法が改善し、磁気ノズルの伸長現象等の、将来的な無電極推進機開発につながる現象を発見し、高い学術的意義を示すとともに、さらなる研究展開のシナリオを与えた。また無電極推進機開発は、将来の宇宙開発の基幹技術となりうるため、その意義は大きいと期待される。今後学術研究をより進展させるとともに、工学要素を包括した研究開発が必要となる。

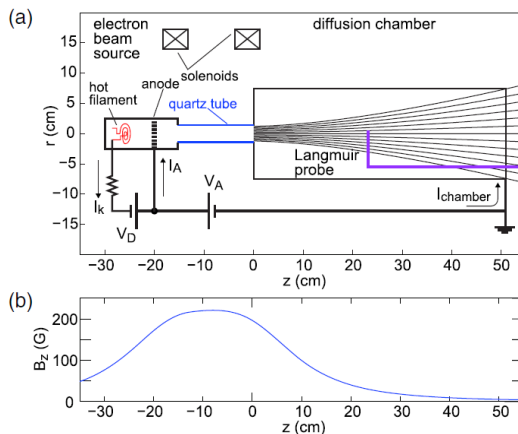
研究成果の概要(英文)：It has been shown that the plasma-gas interaction in an electrodeless high density plasma thruster plays important roles in the momentum transport, the momentum loss to the wall, and the generation of the thrust. By progressing the understanding and developing the control method of the plasma-gas interaction, generation of the high-density plasma flow and the performance improvement of the plasma thruster has been performed. These insight and laboratory experiments can provide various interesting phenomena such as a transition of the plasma-flow-state from diverging to stretching the magnetic nozzle, and the adiabatic expansion of free electrons in the magnetic nozzle. These insight will contribute to expansion of fundamental scientific researches and thruster development hereafter. Furthermore, development of peripheral equipment such as the RF system was started; leading further expansion of the research to the engineering step.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：プラズマ・核融合 電気推進 ヘリコンスラスタ プラズマガス相互作用



W 2: Momentum Vector Measurement Instrument

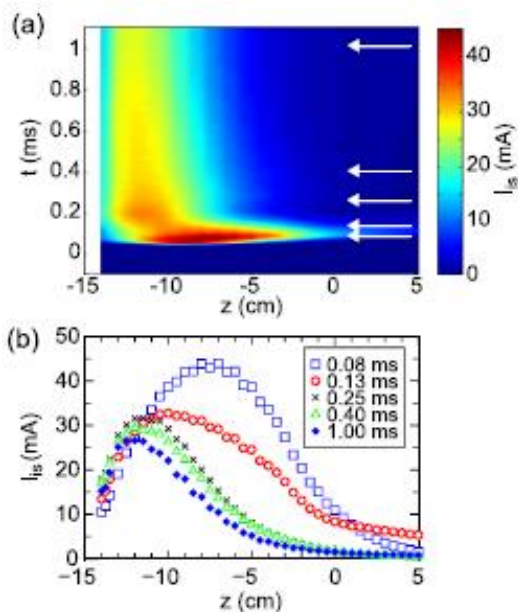


W 3: (a) Schematic of the Langmuir probe setup. (b) Plot of magnetic field B_z (G) versus axial position z (cm).

Instruments (MVMI) (W 2),

1) 2) 3) 4) 5) 6) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100)

Mega-HPT



W 4: Plot of ion saturation current I_{is} (mA) versus axial position z (cm) for different time delays.

(W 3) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100)

>2) % EBY

W 4 c) vj

% K > *

13.56 MHz, 5 kW b90

7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100)

56) b0) p) 6)

±) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100)

= -7 cm) 3) 4) 5) 6) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100)

v) N) 6) 4) 5) &

@) v) 1) 2) 3) 4) 5) 6) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100)

S) > Gb) 1) 2) 3) 4) 5) 6) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100)

K) 8) M) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100)

8) 4) M) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100)

_WS) > Gc) *

0) N) 1) 2) 3) 4) 5) 6) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100)

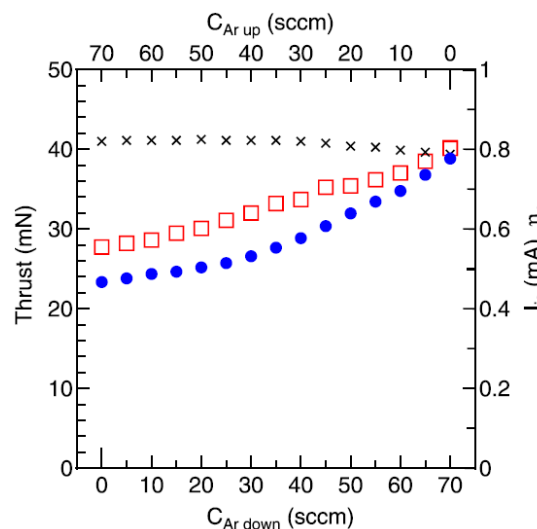
1) 3) 4) 5) 6) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100)

8) > 9) 0) 1) 2) 3) 4) 5) 6) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100)

1) 6) 1) W) v) a) 2) 3) 4) 5) 6) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100)

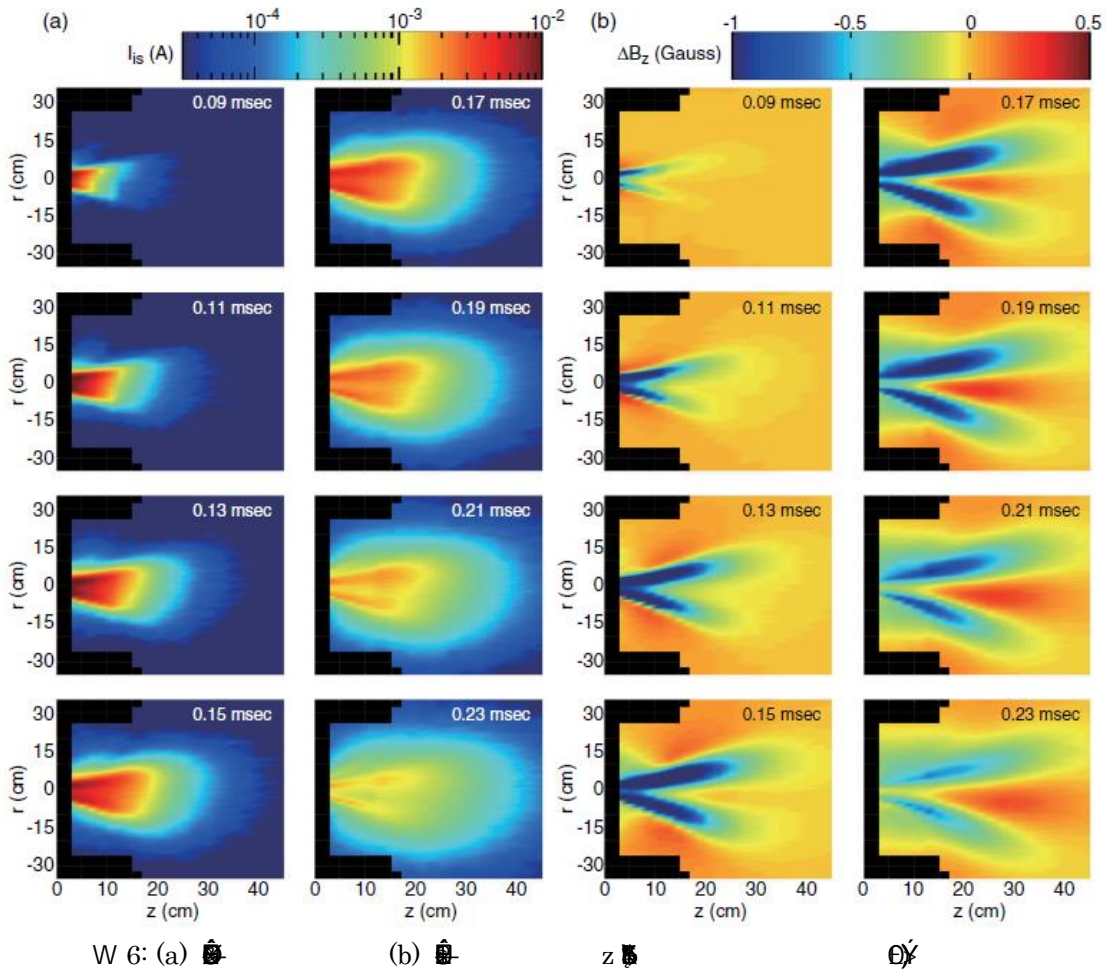
w) M) 6) m) 0) S) G) > N) S) 1) 2) 3) 4) 5) 6) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100)

7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100)



W 5: Plot of Thrust (mN) and ion saturation current I_{is} (mA) versus axial position z (cm). The top x-axis shows $C_{Ar\ up}$ (sccm) and the bottom x-axis shows $C_{Ar\ down}$ (sccm).

(W 5)>, rS>\$
 3b MVMI # 8283E4 5PWSG>3H#4 .
 5P WZGQS>, rS>* h8DMm2K
 Zj)gg AggK>* #S>8MS4†
 GPN998KS>, PIC MSG>pCh8
 lb4 5WGP>#SKS4u>* 50ZESB
 M4b9)W1&MGQS>,O
 W 6 c>* (a) #g (b) W
 Z2s1GH% ΔBz b56E9†, W 6(a)_gMf_>B
 W va WZMG>G b7bE2s0b>* ΔBz < 0 b8Z>N@*
 W 6(b)l_<< #E>8Z z = 20 cm E4)KS7.>*
 8oE>M9væ ΔBz > 0 b8b4SKZGEGE_WZ
 ΔZG Mvb> & \$IO. B& ΔZG Mvb> & \$IO. B&
 6IO #H&ZG @ZIS<>, Gb ΔBz
 b6M)(<># MA = 0.2 #G* G#*
 MA = 1 PsG>#S&6AC)2sGG\ Gb#PKZ# MHD #S0#>δ
 #G\ B&S>, Gb#B0600#E
 d>#7#B&VA G&S<>,



- Applied Physics (1w), **50**, 265201 (2017), DOI:10.1088/1361-6463/aa7524.
- x Kazunori Takahashi, Hikaru Akahoshi, Christine Charles, Rod W. Boswell, and Akira Ando, “High temperature electrons exhausted from rf plasma sources along a magnetic nozzle”, Physics of Plasmas (1w), **24**, 084503 (2017), DOI:10.1063/1.4990110.
 - y Kazunori Takahashi and Akira Ando, “Laboratory Observation of a Plasma-Flow-State Transition from Diverging to Stretching a Magnetic Nozzle”, Physical Review Letters (1w), **118**, 225002 (2017), DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.225002.
 - z Kazunori Takahashi, Yoshinori Takao, and Akira Ando, “Modifications of plasma density profile and thrust by neutral injection in a helicon plasma thruster”, Applied Physics Letters (1w), **109**, 194101 (2016), DOI: 10.1063/1.4967193.

❖ 56 ❖

- q Kazunori Takahashi, “Adiabatic expansion of electron gas interacting with a magnetic nozzle”, The 71st Annual Gaseous Electronics Conference (2018).
- r Kazunori Takahashi, “Localized electron heating and cooling in a magnetic-filtered standing helicon source”, The 15th International Conference on Advanced Materials (2017). (Invited Talk).
- s Kazunori Takahashi, “Plasma momentum imparted by a magnetic nozzle helicon plasma”, The 18th International Congress on Plasma Physics (2016). (Invited Talk)
- t Kazunori Takahashi, “Neutral-depletion-induced asymmetric plasma density profile and momentum transport in a helicon thruster”, The 69th Annual Gaseous Electronics Conference (2016).

❖

https://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressimg/tohokuuniv-press20160401_02web.pdf
https://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressimg/tohokuuniv-press20170605_03web.pdf
https://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressimg/tohokuuniv-press20180130_01web.pdf
https://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressimg/tohokuuniv-press-20180927_03web-space%20debris.pdf

>4>, %É)É

(1)%É*..

%É8 § &
 (TAKAO Yoshinori)
 d%É8
 4\$8 ÉTdÉ7T
 É8 M5
 %É& 8 F>8 80552661

%É8 ` 8
 (KOMURO Atsushi)
 d%É8
 4\$8 ÉTdÉÉ
 É8 M
 %É& 8 F>8 70733137

%É8 á í
 (ANDO Akira)
 d%É8
 4\$8 ÉTdÉÉ
 É8 M5
 %É& 8 F>8 90182998

※